

Untersuchungen zum Einfluss gezielt nicht geradlinig eingebrachter Faserverstärkungen auf die
mechanischen Eigenschaften einer nachgiebigen Polymermatrix

Dissertation
zur
Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
der Universität Rostock

vorgelegt von

Jan Brökel, geb. am 10. Juli 1976 in Rostock
aus Beselin

Rostock, den 12.09.2007

URN: urn:nbn:de:gbv:28-diss2008-0043-1

Untersuchungen zum Einfluss gezielt nicht geradlinig eingebrachter Faserverstärkungen auf die mechanischen Eigenschaften einer nachgiebigen Polymermatrix

Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik der Universität Rostock, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik und Leichtbau, Rostock, Sommer 2007

| | |
|-----|-----------------|
| 117 | Seiten |
| 87 | Abbildungen |
| 29 | Tabellen |
| 79 | Literaturzitate |

Referat

Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) werden als Strukturbauteile sowohl in Luft- und Raumfahrt als auch vermehrt in Alltagsgegenständen eingesetzt. Für die meisten Anwendungen stellen sie auf Grund der hohen spezifischen Steifigkeiten und Festigkeiten in Kombination zu den sehr vielseitigen Verarbeitungsmöglichkeiten eine gute Wahl dar. Mit den hier vorgestellten nachgiebigen Faser-Kunststoff-Verbunden (N-FKV) sind sowohl FKV-typische spezifische Festigkeiten als auch hohe Dehnungen bis 20 % möglich. Daneben sind alle FKV typischen Verarbeitungsmöglichkeiten, vor allem die Belastungsorientierung der Fasern, nutzbar. Zur Herstellung laminierbarer flächiger welliger Faserlagen wurde ein Schwenkmechanismus entwickelt. Die damit hergestellten Proben zeigen einen stark nicht linearen Spannungs-Dehnungs-Verlauf und eine Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften vom Welligkeitsverhältnis. Damit ist es möglich, biologische Materialeigenschaften gezielt nachzubilden. Spannungsoptische Versuche verdeutlichen die Interaktion der welligen Faser mit der nachgiebigen Matrix und die Ergebnisse sind mit FE Berechnungen belegt. Mittels verdrehter und geflochtener Rovings und der Kombination dieser geometrischen Dehnungen mit einer nachgiebigen Matrix wurden flexible Seilstrukturen hergestellt. Die untersuchten helixförmig verstärkten elastischen Seile hatten ein nichtlineares Werkstoffverhalten und ermöglichten Dehnungen bis 19 %. Für die entwickelten N-FKV sind weitere Entwicklungsfelder und mögliche Anwendungen aufgezeigt.

Schlagworte

FKV, Nachgiebigkeit, Faserwelligkeit

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. G. Scharf

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/Leichtbau

Universität Rostock

Albert-Einstein-Straße 2

18059 Rostock

Prof. Dr.-Ing. habil. O. Keßler

Lehrstuhl für Werkstofftechnik

Universität Rostock

Albert-Einstein-Straße 2

18059 Rostock

Priv. Doz. Dr.-Ing. habil. N. Himmel

Institut für Verbundwerkstoffe GmbH

Erwin-Schrödinger-Straße, Gebäude 58

67663 Kaiserslautern

Tag der Verteidigung:

11.04.2008

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | Einleitung..... | 1 |
| 1.1 | Problemstellung..... | 2 |
| 1.2 | Zielsetzung..... | 3 |
| 1.3 | Vorgehensweise..... | 4 |
| 2 | Grundlagen der N-FKV..... | 5 |
| 2.1 | Endlosfaserverstärkte Kunststoffe..... | 5 |
| 2.1.1 | Steife Matrices für FKV..... | 7 |
| 2.1.2 | Nachgiebige Matrices für FKV..... | 8 |
| 2.1.3 | Anwendungen von nachgiebigen FKV..... | 10 |
| 2.2 | Faserwelligkeit in biologischen Geweben..... | 12 |
| 2.2.1 | Natürliche Sehnen..... | 14 |
| 2.2.2 | Künstliche Sehnen..... | 18 |
| 2.3 | Faserwelligkeit in technischen Strukturen..... | 19 |
| 2.3.1 | 2D Umlenkung von Faserverstärkungen..... | 24 |
| 2.3.2 | 3D Umlenkung von Faserverstärkungen..... | 26 |
| 2.3.3 | Ein rheologisches Modell für N-FKV..... | 28 |
| 2.3.4 | Vergleich und Bewertung von Herstellungsverfahren für N-FKV..... | 30 |
| 3 | Untersuchungen flächiger N-FKV..... | 38 |
| 3.1 | Verwendete Werkstoffkomponenten für flächige N-FKV..... | 38 |
| 3.2 | Versuchsaufbau und Durchführung..... | 41 |
| 3.3 | Mechanische Eigenschaften verstärkter Polyesterharze..... | 42 |
| 3.4 | Mechanische Eigenschaften von flächigen N-FKV..... | 45 |
| 3.4.1 | Einfluss der Welligkeit auf die mechanischen Eigenschaften..... | 46 |
| 3.4.2 | Einfluss des Halbzeuges auf die mechanischen Eigenschaften..... | 51 |
| 3.4.3 | Die Interaktion welliger benachbarter Lagen in N-FKV..... | 53 |
| 3.4.4 | Dynamische Versuche an flächigen N-FKV..... | 55 |
| 3.5 | Spannungsoptische Versuche und Finite-Element-Analysen von flächigen N-FKV..... | 58 |
| 3.5.1 | Spannungsoptische Versuche..... | 58 |
| 3.5.2 | Finite-Element-Analysen..... | 66 |
| 3.6 | Andere nicht geradlinige flächige Faserverstärkungen in N-FKV..... | 70 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.7 Diskussion der Untersuchungen von flächigen N-FKV..... | 72 |
| 4 Untersuchungen seilförmiger N-FKV..... | 78 |
| 4.1 Werkstoffkomponenten für seilförmige N-FKV..... | 78 |
| 4.2 Versuchsaufbau und Durchführung..... | 80 |
| 4.3 Gedrillte und geflochtene E-Glas Rovings in nachgiebigen Matrices..... | 83 |
| 4.4 Geflochtene Kohlenstofffaser Rovings in einer nachgiebigen Silikonmatrix..... | 85 |
| 4.5 Helixförmige Kohlenstofffaser Rovings in einer nachgiebigen Silikonmatrix..... | 89 |
| 4.6 Diskussion der Untersuchungen von seilförmigen N-FKV..... | 92 |
| 5 Zusammenfassung und Ausblick..... | 94 |
| 5.1 Zusammenfassung..... | 94 |
| 5.2 Ausblick..... | 95 |
| 6 Summary..... | 99 |
| 7 Formelzeichen und Abkürzungen..... | 100 |
| 7.1 Formelzeichen..... | 100 |
| 7.2 Indizes..... | 100 |
| 7.3 Abkürzungen..... | 101 |
| 8 Literaturverzeichnis..... | 102 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1: Reales und idealisiertes Gewebe mit deutlichen Faserauslenkungen..... | 1 |
| Abbildung 2: extreme Faserwelligkeit im gepressten Prepreg Bauteil..... | 1 |
| Abbildung 3: Erwartetes Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines möglichen N-FKV..... | 3 |
| Abbildung 4: Oberflächenvergleich von Faser und Würfel bei gleichem Volumen, [Mos92]..... | 6 |
| Abbildung 5: Reaktion von Säureanhydriden mit Diolen zu UP-Harz [Häb03]..... | 7 |
| Abbildung 6: Reifenaufbau mit Werkstoffschichten [www.kiswire.com]..... | 11 |
| Abbildung 7: Textilgurtaufbau [MeM02]..... | 11 |
| Abbildung 8: Pneumatischer Muskel [Fes06], gewickelte FKV Welle mit flexibler Mitte..... | 12 |
| Abbildung 9: Verbundwerkstoff Holz, Wabenstruktur und Cellulosefasern [Gor89]..... | 13 |
| Abbildung 10: Schematischer Vergleich des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von einem gummielastischen Polymer, biologischem Gewebe und Vergütungsstahl, [Gor89]. | 13 |
| Abbildung 11: Kollagenfibrille mit Wellung (Negativaufnahme) [Gor89]..... | 14 |
| Abbildung 12: Kraft-Dehnungs-Verlauf von Sehne (LNAT) und FEA (ABAQUS), [CoV02] | 16 |
| Abbildung 13: Verschiedene biomechanische Modelle zur Beschreibung des Spannungs-Dehnungs- Verhaltens der Achillessehne [KCH00]..... | 17 |
| Abbildung 14: Schematische Theorie und Praxis der Faserorientierung, [Mos92]..... | 20 |
| Abbildung 15: 3D Welligkeit und 2D Welligkeit..... | 20 |
| Abbildung 16: Approximation der Sinusfunktion durch einen Polygonzug..... | 21 |
| Abbildung 17: Winkel Θ zwischen Tangente und X-Achse..... | 22 |
| Abbildung 18: Phasenlage benachbarter Fasern, nach [Swi75]..... | 22 |
| Abbildung 19: Geometrie und Koordinatensysteme, nach Akbarov [KoA03]..... | 23 |
| Abbildung 20: Schematischer helixförmiger Faserverlauf..... | 24 |
| Abbildung 21: Sinusförmige 2D Welligkeit mit Belastungen und KS, nach [Pas05] | 24 |
| Abbildung 22: Z-Pins, im Längs- und Querschnitt [ScE04]..... | 25 |
| Abbildung 23: Genähter Vorformling des IPF [Gri06]..... | 26 |
| Abbildung 24: Faser Verformungen durch Nähen , Schema und Schnittbild, [SHe01]..... | 26 |
| Abbildung 25: Schematische 3D Welligkeit, P-ES und G-ES..... | 27 |
| Abbildung 26: CFK Balken mit ungleichmäßiger 3D Welligkeit, Negativaufnahme [Mur99]..... | 27 |
| Abbildung 27: Rheologische Modelle, li. FKV und re. N-FKV , nach Paschen [Pas05]..... | 29 |
| Abbildung 28: UD-Verbund mit parallel geschalteter Faser und Matrix, [Pas05]..... | 29 |
| Abbildung 29: Rheologisches Modell für Sehnengewebe, nach Otte et al. [OSc88]..... | 29 |
| Abbildung 30: Verpin - Mechanismus mit verzerrtem Halbzeug..... | 30 |
| Abbildung 31: Schematischer Pressvorgang zur Erzeugung von 3D Welligkeit..... | 31 |
| Abbildung 32: Mechanismus zum Verzerren von flächigen Faser-Halbzeugen..... | 32 |
| Abbildung 33: Li.: Fehlstellen nach Verzerren, Re.: keine Fehlstellen nach Schwenken..... | 32 |
| Abbildung 34: Virtueller und realer Fertigungsprototyp – Version 1..... | 32 |
| Abbildung 35: Virtueller und realer Fertigungsprototyp – Version 2..... | 33 |
| Abbildung 36: Modifizierter Wickelkopf zum Legen welliger Fasern..... | 34 |
| Abbildung 37: Verpinnen, li.: real CF+PU, re.: Schema | 35 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 38: Gebrochene wellig verstärkte UP-Proben, oben Gewebe, unten Gelege..... | 43 |
| Abbildung 39: Spannungs-Dehnungs-Kurven verstärkter EP und UP Harze..... | 44 |
| Abbildung 40: Schema des Schädigungsverlaufes für UP-2 und UP-4, [Rei05]..... | 44 |
| Abbildung 41: Spannungs-Dehnungs-Kurve des unverstärkten Polyurethans PPT..... | 45 |
| Abbildung 42: Spannungs-Dehnungs-Kurven von N-FKV mit 600 g/m ² Gewebe | 46 |
| Abbildung 43: Probe 9PU/1 bei 4000N mit Oberflächenwelligkeit, Negativaufnahme..... | 47 |
| Abbildung 44: Seitenansicht der verformten Probe 12PU/2 im Zugversuch..... | 48 |
| Abbildung 45: Ausgeschnittene Probe 25PU/2, Belastungsfolge bis zum Versagen..... | 49 |
| Abbildung 46: Spannungs-Dehnungs-Kurven von N-FKV mit 250 g/m ² Gelegeverstärkung..... | 50 |
| Abbildung 47: Spannungs-Dehnungs-Kurven verschiedener faserverstärkter W-FVK..... | 52 |
| Abbildung 48: Spannungs-Dehnungs-Kurven verschiedener mehrlagiger W-FVK..... | 54 |
| Abbildung 49: Gewebeverzerrung und entstehendes Schubfeld mit Längenänderung..... | 57 |
| Abbildung 50: Einspannungen von N-FKV Proben..... | 57 |
| Abbildung 51: Probe 22PU/4, oben vor dem Versuch, unten nach 400 Lastwechseln..... | 57 |
| Abbildung 52: Aufbau des zirkularen spannungsoptischen Versuchstandes, nach [Wol76]..... | 59 |
| Abbildung 53: Geometrien der spannungsoptischen Proben..... | 61 |
| Abbildung 54: Spannungs-Dehnungs-Kurven der spannungsoptischen Proben..... | 62 |
| Abbildung 55: Dunkelfeldaufnahme bei steigender Belastung, SO-3..... | 62 |
| Abbildung 56: Dunkelfeldaufnahme bei steigender Belastung, SO-4..... | 63 |
| Abbildung 57: Dunkelfeldaufnahme bei steigender Belastung, SO-5 unterer Teil..... | 64 |
| Abbildung 58: Dunkelfeldaufnahme bei steigender Belastung, SO-6..... | 65 |
| Abbildung 59: Dunkelfeldaufnahme bei steigender Belastung, SO-9..... | 65 |
| Abbildung 60: Analytische Betrachtung des Gelenk-Modells..... | 65 |
| Abbildung 61: Zusammenhang zwischen Längenänderung und Amplitude am Gelenk..... | 66 |
| Abbildung 62: Kraft-Weg-Verläufe der verschiedenen Elementtypen..... | 68 |
| Abbildung 63: Kraft-Weg-Verläufe der verschiedenen Werkstoffmodelle..... | 69 |
| Abbildung 64: Qualitative relative 1. Hauptspannungsverteilung in SO-3 und SO-6 | 69 |
| Abbildung 65: Signifikante Spannungs-Dehnungs-Kurven der Reihen 5PU, 17PU und 20PU..... | 71 |
| Abbildung 66: Zusammenhang von Welligkeitsverhältnis und Bruchdehnung flächiger N-FKV..... | 72 |
| Abbildung 67: Spannungen über die Dicke bei ungleichmäßig verstärkter PU-Probe..... | 74 |
| Abbildung 68: Ausgewählte N-FKV mit entsprechenden Sehnen-Näherungen..... | 75 |
| Abbildung 69: Qualitative spannungsoptische und numerische relative Spannungsverteilung..... | 77 |
| Abbildung 70: Rolleneinspannung, gerissener Roving, Geflecht, gerissenes getränktes Geflecht.... | 82 |
| Abbildung 71: Einfluss von Verdrehung von E-Glas Rovings auf deren Zugfestigkeit | 83 |
| Abbildung 72: Einfluss der Verdrehung von E-Glas Rovings auf deren Bruchdehnung | 84 |
| Abbildung 73: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von E-Glas Roving Flechtsträngen..... | 85 |
| Abbildung 74: Flechtstrangvarianten mit verschiedenen Matrixapplikationen..... | 86 |
| Abbildung 75: Bruchdehnungen aller CF-Flechtstrangreihen..... | 87 |
| Abbildung 76: Spannungs-Dehnungs-Kurven signifikanter CF-Roving Flechtstrangproben..... | 87 |
| Abbildung 77: Zugfestigkeiten aller CF-Flechtstrangreihen..... | 88 |
| Abbildung 78: Typisches Kraft-Weg-Diagramm eines Flechtstranges, Probe CR3/21..... | 89 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 79: Helixförmige Strukturen, v. u. Ideengeber, Modell und Versuchskörper..... | 90 |
| Abbildung 80: Kraft-Weg-Verläufe der helixförmig verstärkten Proben H1, H3, H4 und H5..... | 90 |
| Abbildung 81: Kraft-Weg-Verlauf der helixförmig verstärkten Probe H2..... | 92 |
| Abbildung 82: Welligkeitsamplitude a im Verlauf der Probenlänge x | 96 |
| Abbildung 83: Knochen - Sehnen - Muskel - Verbindung [Wag06]..... | 97 |
| Abbildung 84: Probe mit freischneidbarem Bereich, Schema und real (PU25)..... | 97 |
| Abbildung 85: Flächige Probe bei Belastung (12PU), seilförmige Probe unter Last (Helix-2)..... | 97 |
| Abbildung 86: Cadence HP-Light Prothesenfuß [SeS03]..... | 98 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 1: Mechanische Kennwerte von Verstärkungsfasern, nach [FZR95]..... | 6 |
| Tabelle 2: Eigenschaften von biologischen und technischen Materialien..... | 15 |
| Tabelle 3: Anforderungen an den Herstellungsprozess und deren Gewichtung | 35 |
| Tabelle 4: Morphologischer Kasten zum Fertigungsprozess und mögliche Varianten..... | 36 |
| Tabelle 5: Bewertungsschema zum Herstellungsprozess (N: Note, W: Wichtung)..... | 37 |
| Tabelle 6: Merkmale flächiger Glasfaser Verstärkungshalbzeuge..... | 38 |
| Tabelle 7: Verstärkungshalbzeuge für flächige N-FKV..... | 39 |
| Tabelle 8: Verwendete Matrices für flächige N-FKV..... | 40 |
| Tabelle 9: Abweichungen der Probenabmessungen..... | 42 |
| Tabelle 10: Mechanische Kennwerte der Zugprüfungen an UP-Proben mit verschiedenen Glasfaserverstärkungen..... | 43 |
| Tabelle 11: Mechanische Kennwerte der Zugprüfungen an PUR-Proben mit 600 g/m ² Glasgewebeerstärkung..... | 47 |
| Tabelle 12: Mechanische Kennwerte der Zugprüfungen an PUR-Proben mit 250 g/m ² Glasgelegeverstärkung..... | 50 |
| Tabelle 13: Mechanische Kennwerte der Zugprüfungen an PUR-Proben mit Verstärkungen aus 1000g/m ² + 250 g/m ² Glasgelege und 600g/m ² + 163g/m ² Glasgewebe..... | 52 |
| Tabelle 14: Mechanische Kennwerte der Zugprüfungen an PUR-Proben mit 600 g/m ² Glasgewebeerstärkung..... | 54 |
| Tabelle 15: Mechanische Kennwerte der Zugprüfungen an PUR-Probenreihe 22PU mit 600 g/m ² Glasgewebeerstärkung..... | 55 |
| Tabelle 16: Mechanische Kennwerte der Zugprüfungen an PUR-Probenreihe 23PU mit 600 g/m ² Glasgewebeerstärkung..... | 56 |
| Tabelle 17: Materialkennwerte von PUR..... | 60 |
| Tabelle 18: Kennwerte spannungsoptischer Proben aus PUR mit welliger Verstärkung..... | 60 |
| Tabelle 19: Verwendete Elementtypen in Abaqus..... | 67 |
| Tabelle 20: Beschreibung der verwendeten Materialmodelle, [ABA06]..... | 68 |
| Tabelle 21: Gemittelte mechanische Kennwerte der Zugprüfungen an den Reihen 5PU, 17PU und 20PU..... | 71 |
| Tabelle 22: Welligkeitsverhältnisse und Bruchdehnungen von flächigen N-FKV Probenreihen..... | 72 |
| Tabelle 23: Mechanische Kennwerte der Rovings für seilförmige N-FKV..... | 78 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 24: Grundcharakteristika von Glas- und Kohlenstofffaserrovings..... | 79 |
| Tabelle 25: Gegenüberstellung von Matrices zur N-FKV Herstellung..... | 79 |
| Tabelle 26: Merkmale der seilförmigen Probenreihen..... | 81 |
| Tabelle 27: Vergleich der Materialkennwerte für EC 2400 tex..... | 83 |
| Tabelle 28: Vergleich der Zug-Materialkennwerte für CF-Roving T800B..... | 86 |
| Tabelle 29: Parametrik der helixförmig verstärkten Proben..... | 91 |

1 Einleitung

Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) zählen seit einigen Jahrzehnten in den verschiedensten Branchen zu den wichtigsten und gebräuchlichsten Leichtbauwerkstoffen. Am gebräuchlichsten sind Glasfaser verstärkte Duroplaste, wobei mit steigenden Ansprüchen die Verbreitung von Kohlefaser zunimmt. FKV zeichnen sich im allgemeinen durch hohe spezifische Festigkeiten und Steifigkeiten aus. Natürlich hängen diese Eigenschaften stark von den verwendeten Komponenten und dem Verarbeitungsverfahren ab [BrS04].



Abbildung 1: Reales und idealisiertes Gewebe mit deutlichen Faserauslenkungen

Bei der Verwendung von FKV ergibt sich durch die Vielzahl von Komponentenkombinationen ein weites Spektrum von konstruierbaren Werkstoffeigenschaften. Der Grundgedanke bei fast allen gängigen FKV-Anwendungen ist, die Verstärkungs Komponente nahezu gestreckt in der Hauptbelastungsrichtung zu orientieren, um die guten mechanischen Eigenschaften der Verstärkungsfasern möglichst optimal zu nutzen [Mic94]. Trotzdem ist die Fertigung eines perfekten Verbundwerkstoffes nicht möglich, da sich zum einen während der Verarbeitung, entweder Verfahrens- oder Prozess bedingt, die gestreckten Fasern krümmen. Bei der Verarbeitung von Gewebhalbzeugen sind zum anderen die Endlosfasern durch die Verwindung der gängiger Weise orthogonal zueinander verlaufenden Fasern gekrümmt, siehe Abbildung 1. Diese Krümmung, im Englischen als „Waviness“ bezeichnet, ist analytisch annähernd erfassbar und führt zu verminderten Materialeigenschaften [Mos92]. Daneben kommt es auch bei der Verarbeitung von eigentlich geraden Fasern, wie bei unidirektionalen Gelegen, zur Faserkrümmung. Diese entsteht beim Laminieren und Verpressen mehrerer UD-Lagen in unterschiedliche Richtungen. Hierbei bilden

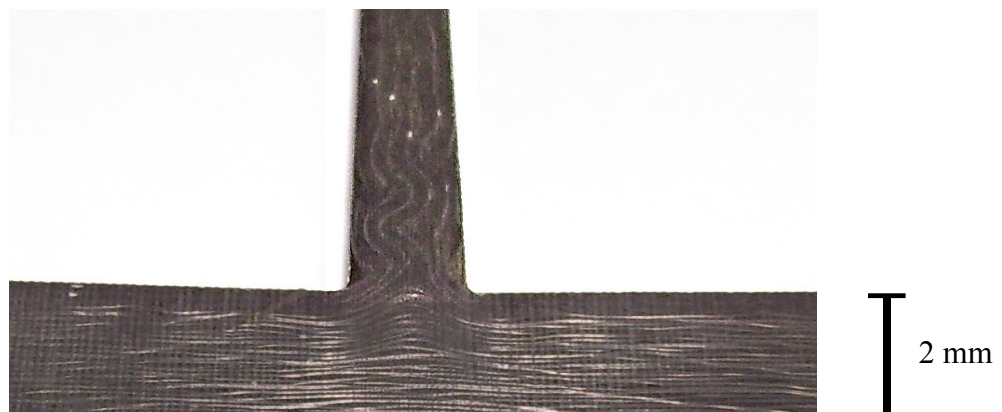


Abbildung 2: extreme Faserwelligkeit im gepressten Prepreg Bauteil

die unteren Lagen ein unebenes Bett für den folgenden Laminataufbau. Selbst bei der Verwendung des sehr hochwertigen Wickelverfahrens kommt es trotz hoher Fadenspannungen zu Faserwelligkeit, da sich bei der Kreuzwicklung die Lagen kreuzen. Auch bilden die innen liegenden Lagen einen unebenen Untergrund für die äußeren Schichten.

Ähnliche Probleme treten bei fast jeder Art von Pressen, sei es bei der Vakuumsack- oder Autoklaventechnik oder bei Resin-Transfer-Moulding, auf. Hier entstehen ungewollte Faserverschiebungen und Faserwelligkeiten durch das Verpressen der Lamine in geometrisch komplexe Formen oder durch das Fließen der Matrix durch die trockenen Faserhalbzeuge in die geschlossene Form. Bei allen Polymeranwendungen kommt es beim Aushärten zur Matrixschrumpfung, was zum Stauchen und Verformen der Fasern führt. Diese Schrumpfung ist bei Duromeren durch die polymere Aushärtreaktion (EP 0,5-2,3%, UP 7-8%) und bei Thermoplasten (PE 1,5-3,5%, PVC 0,2-2,5%) durch das Abkühlen des geschmolzenen Matrixmaterials bedingt. Je nach Fasergehalt und Faserorientierung wird diese Schwindung behindert und vermindert (GFK UP/EP 0,4%). Durch unterschiedliche Schrumpfungsgrade verschiedener Matrices und deren Abhängigkeit von der Verstärkungsart sind die entstehenden Faserwelligkeiten schwer vorhersagbar [Fra96], [Men90]. Trotz der großen Breite von konstruierbaren Materialeigenschaften sind FKV durch die meist gewünschte hohe Steifigkeit der Fasern und die Sprödhheit der gängigen Matrices für einige Nischenanwendungen nicht verwendbar. Solche Nischen sind in den Bereichen Schwingungsdämpfung, Schwingungsentkopplung und Transportbänder zu finden. Hier ist oft eine Kombination von Festigkeit und Flexibilität gefragt.

1.1 Problemstellung

Ausgehend von Anregungen aus der Bionik wurde die Anwendung von nachgiebigen Kunststoffen als Matrix für flexible faserverstärkte Polymere bisher nur ansatzweise untersucht. Genauere Untersuchungen zur Verwendung von Polyurethan und Silikon als Matrix waren meist anwendungsbezogen oder bezogen sich auf Elastomere allgemein, siehe [GaB97] und [Kos00]. Andere Untersuchungen beschäftigten sich mit der Faserwelligkeit, doch zumeist mit 3D Auslenkung (nicht in der Laminebene gewellt) [HWD94], [CSD01], [ChT87]. Auch der Einfluss der Welligkeit von Gewebeverstärkungen [CoF97], [WKL02], der Beeinträchtigung der Eigenschaften durch Vernähen [KFL01], [CoF97] und der numerischen Analyse der Welligkeit von Verstärkungsfasern im FKV [AKU04] wurden betrachtet. Arbeiten zur Herstellung und Analyse von 2D Faserwelligkeit (Auslenkung in der Laminebene) und vor allem die Kombination von stark ausgelenkten Fasern und einer nachgiebigen Polymer Matrix findet sich in der Literatur wenig, [KTC88]. Außerdem wurden die Möglichkeiten der gezielten Faserauslenkung bisher nicht umfassend dargestellt und auch nicht positiv bewertet. Des weiteren fehlt die systematische Betrachtung der Verwendbarkeit gängiger FKV Halbzeuge zur Herstellung von flächigen und seilförmigen Nachgiebigen Faser-Kunststoff-Verbunden (N-FKV) und auch Fertigungskonzepte sind nicht beschrieben. Die Auswirkungen der Faserwelligkeit wurden von Kuo et. al. [KTC88] mittels spannungsoptischer Verfahren dargestellt, aber eine Untersuchung einzelner welliger Fasern mit verschiedenen Geometrien wurde nicht durchgeführt.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist das Abschätzen der Möglichkeiten einer neuen Werkstoffkombination, die darauf basiert, die allgemein gültige Gradlinigkeit von Fasern im FKV durch eine gewollte Welligkeit zu ersetzen. Einhergehend muss die steife Matrix (üblicherweise Polyester- oder Epoxidharze) durch eine nachgiebigere Polymermatrix (z. B. Polyurethan) ersetzt werden. Wenn die steifen Verstärkungskomponenten nicht gestreckt in der relativ nachgiebigen Matrix vorliegen, dann werden sie sich bei Belastung strecken und den Verbund damit versteifen. Das erwartete progressive Materialverhalten, wie in Abbildung 3 gezeigt, und der harte definierte Anschlag nach erfolgter kompletter Faserstreckung sind als Zieleigenschaften nachzuweisen. Die mit N-FKV erreichbare maximale Dehnung soll klar über der bekannten FKV liegen und trotzdem müssen eine möglichst hohe spezifische Festigkeit und Endsteifigkeit vorhanden sein. Diese mechanischen Eigenschaften, welche denen von biologischen Geweben nahe kommen sollen, müssen durch Experimente belegt und durch analytische Modelle beschrieben werden. Numerische Analysen sollen das prinzipielle Verhalten der Faserstreckung nachbilden und Aufschluss über die auftretenden Belastungen geben. Hierbei steht der Vergleich mit den experimentell gewonnenen spannungsoptischen Daten im Vordergrund. Der gewünschte Verbundwerkstoff soll in seiner

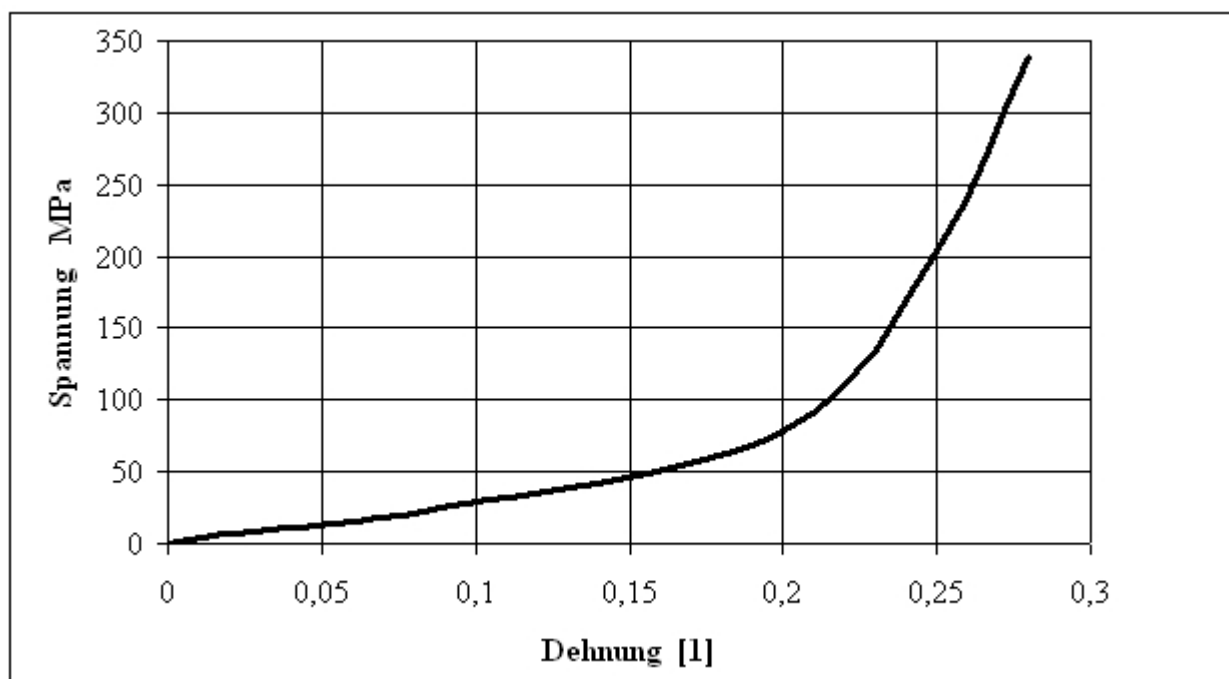


Abbildung 3: Erwartetes Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines möglichen N-FKV

Handhabung und Verarbeitung an die gängigen FKV angelehnt sein. Die Verwendung von etablierten Prozessen und Verfahren und auch die Nutzung verfügbarer Faserhalbzeuge sind angestrebt. Daher sollen sowohl bekannte Halbzeuge (Matrices und Fasern) aus dem Bereich der FKV auf eine mögliche Verwendbarkeit geprüft als auch Prozesse und Verfahren analysiert und gegebenenfalls angepasst werden. Als Prämisse soll die einfache Laminierbarkeit (schichtweiser Aufbau des Verbundwerkstoffes) und damit die Möglichkeit der Konstruktion der Werkstoffeigenschaften zu sehen sein.

1.3 Vorgehensweise

Da das Phänomen der fiber waviness (Faserwelligkeit) nicht neu ist, dient eine umfangreiche Aufarbeitung der bisherigen Untersuchungen zum Thema „fiber waviness / Faserwelligkeit“ als Grundlage dieser Arbeit. Hierbei ist vor allem die besondere Sichtweise dieser Arbeit auf die im Allgemeinen nicht gewünschten und als Fehler betrachteten Fasernichtgeradlinigkeiten und Welligkeiten hervorzuheben. Die verfügbaren Untersuchungen zum Einfluss von Faserfehlorientierung auf die Materialeigenschaften des Verbundwerkstoffes werden kritisch und unter neuer Sichtweise analysiert. Biomechanische Versuche zur Herstellung von künstlichen Sehnen und biomechanische Werkstoffdaten natürlicher Sehnen sollen als Ziel für die Werkstoffe gelten.

Ausgehend von einer Untersuchung der möglicher Fasern und Matrices, wird das Zusammenspiel von Streckungsgrad der Fasern und der Einfluss verschiedener Faserorientierungen auf die Werkstoffeigenschaften erarbeitet. Grundlage für die Werkstoffuntersuchungen ist eine Fertigungstechnologie, welche Proben mit reproduzierbarer Qualität liefert. Die einerseits theoretischen Werkstoffmodelle werden durch experimentelle Untersuchungen an verschiedenen Faserhalbzeugen validiert. Andererseits sollen mit Hilfe breitgefächerter Versuchsreihen die Materialeigenschaften von flächigen N-FKV bestimmt werden. Experimentelle Untersuchungen stehen dabei im Vordergrund, um sowohl die Herstellungsverfahren zu testen als auch die Einflüsse von Fertigungsparametern auf die Werkstoffeigenschaften zu belegen. Durch die Auswertung von Zugversuchen und spannungsoptischen Untersuchungen wird die Faser – Matrix Interaktion an Roving verstärkten Proben analysiert und es werden Vergleiche mit numerischen Berechnungen gemacht. Parallel dazu bietet die Spannungsoptik die Möglichkeit, die Interaktionen von Faserstreckung und Matrixdehnung zu zeigen.

Weiterführende Experimente mit Glas- und Kohlenstofffaserrovings sollen den Einfluss von Verdrehung, Verflechtung und Beschichtungen in Bezug auf Steifigkeit und Zugfestigkeit von seilförmigen N-FKV untersuchen. Die Versuche sollen sowohl am trockenen als auch am getränkten Roving durchgeführt werden.

2 Grundlagen der N-FKV

Vor allem bei Transportsystemen, wie Kraftfahrzeugen, Flugzeugen und in der Raumfahrt, spielt die Reduktion der bewegten Massen eine übergeordnete Rolle und verstärkte Kunststoffe mit ihren hohen spezifischen Festigkeiten und Steifigkeiten bieten den Entwicklern sehr große Spielräume [KW88]. Im Vergleich zu der Entwicklung bei den unverstärkten Polymeren ist die Arbeit mit faserverstärkten Kunststoffen relativ jung [VDI03]. Insbesondere die Fertigungsqualität und Berechnung der inhomogenen und anisotropen Materialien stellen hohe Anforderungen an den Entwickler [Fra96], [Erh99]. Gerade die Wahl der Verbundkomponenten, der Herstellungsparameter und das Erreichen einer hohen Nachhaltigkeit der Konstruktion ist bei FKV herausfordernd, [BrS05a]. Der enge Zusammenhang von Werkstoff und Konstruktion muss in allen Produktlebenslagen durchdacht und sinnvoll sein. Als Beispiel soll hier die schlechte Recyclingfähigkeit von FKV als negative Werkstoffeigenschaft genannt werden [BrS04]. Sollen die Fasern nicht wie allgemein üblich in einer festen Matrix aus Duro- oder Thermoplasten eingebettet werden, sondern einen Elastomer oder nachgiebigen Polymer (z.B. aufgeweichte Epoxidharze, TPE oder Polyurethane) verstärken, dann ist feststellbar, dass sich die Forschung hier im Anfangsstadium befindet. Aengenheyster [Aen98] stellte 1998 Untersuchungen zur Dimensionierung von Verbundwerkstoffen mit Elastomer- bzw. Thermoplastmatrix an. Diese beschreiben zwar eine Ähnlichkeit zwischen einigen Thermoplasten und Elastomeren im Werkstoffverhalten, aber es werden auch entscheidende Unterschiede bei der Verarbeitung beider Stoffgruppen aufgezeigt. Prinzipiell ist es bedingt durch zahllose mögliche chemische Stoffvarianten schwierig, diese unterschiedlichen Stoffgruppen zu vergleichen.

2.1 Endlosfaserverstärkte Kunststoffe

Verbundwerkstoffe, welche aus Fasern und einer Kunststoffmatrix bestehen, lassen durch die Kombination der verschiedenen mechanischen Eigenschaften der Einzelkomponenten ganz neue Werkstoffkennwerte entstehen. So gilt die Faser als Verstärkung und Hauptlastträger im Verbund und die Matrix dient dem Schutz, der Krafteinleitung und der Stabilisierung der Fasern gegen Ausknicken. Hierbei ist das Faserfilament eine Struktur mit 3 - 24 µm Durchmesser und einem optimierten Volumen/Oberflächen Verhältnis. Das besondere Verhältnis ist als Faserparadoxon bekannt und garantiert eine extreme Festigkeit. Das Paradoxon, welches schon 1921 beschrieben wurde, besagt, dass ein Material in Form einer Faser eine viel höhere Festigkeit als in kompakter Form hat. Dies liegt an der abnehmenden Defektzahl bei abnehmendem Durchmesser und ist in Abbildung 4 durch den Vergleich der Oberflächen bei gleichem Volumen verdeutlicht. Nur möglichst lange und gerade Verstärkungsfasern erlauben eine effiziente Ausnutzung der Fasereigenschaften. Trotzdem wird ein Großteil der FKV mit Verstärkungen aus Kurz- (bis 2 mm) und Langfasern (bis 50 mm) hergestellt. Diese qualitativ schlechteren Verstärkungen ergeben sich aus dem Kompromiss zwischen Kosten und Nutzen bzw. Werkstoffqualität und Herstellungsprozess. Kurze Fasern lassen sich mit geringfügig angepasster Spritzgusstechnik verarbeiten und erhöhen trotzdem die Festigkeit- und Steifigkeit gegenüber unverstärktem Kunststoff signifikant. Langfa-

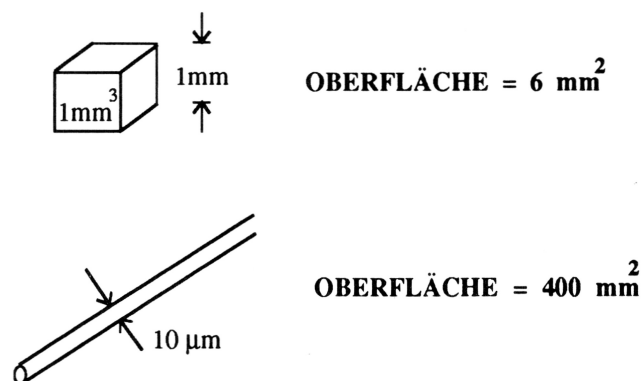


Abbildung 4: Oberflächenvergleich von Faser und Würfel bei gleichem Volumen, [Mos92]

sern lassen sich kostengünstig sprühen oder als Matten legen und bieten in vielen nicht „Hightech“ Bereichen klare Vorteile gegenüber Metallen und nicht verstärkten Kunststoffen.

Als Endlosfasern werden Fasern mit einer Länge ab 50 mm bezeichnet. Sie werden als Rovings, Gelege oder Gewebe verarbeitet. Hierbei liegen die Filamente mehr oder weniger parallel nebeneinander und werden durch Verschlingung und/oder Verdrehung zusammengehalten. Die hohen Faserfestigkeiten und Steifigkeiten werden durch die Nichtgeradlinigkeit bei Geweben (Verschlingen), bei mehrlagigen Gelegen (Verpressen von senkrecht zu einander liegenden Schichten) oder dem Verdrehen von Rovings herab gesetzt.

Gängige Verstärkungsfasern sind Glasfasern, Kohlenstofffasern (Carbon), Aramidfasern und Naturfasern wie Hanf, siehe Tabelle 1. Die verschiedenen Glasfasern (mit E-Glas als verbreitetste Verstärkungsfasern) zeichnen sich durch den geringen Preis, hohe Zugfestigkeit und hohe Bruchdehnung aus. Die Kohlenstofffasern haben einen sehr hohen E-Modul (bis Faktor zehn zur Glas-

Tabelle 1: Mechanische Kennwerte von Verstärkungsfasern, nach [FZR95]

| | Dichte [g/cm ³] | Zugfestigkeit [GPa] | Zugmodul [GPa] | Bruchdehnung [%] |
|-----------------------|--------------------------------|------------------------|-------------------|---------------------|
| Stahl C45 | 7,80 | 6,50 - 8,0 | 200 | 16 |
| E-Glas | 2,54 | 3,5 | 80 | 4,0 |
| Kohlenstoff HT | 1,78 | 3,75 | 240 | 1,6 |
| Kohlenstoff HM | 1,85 | 2,45 | 400 | 0,7 |
| Kevlar 49 | 1,45 | 3,5 | 135 | 1,0 |
| Nylon 66 | 1,2 | 1,0 | < 5 | 20,0 |
| Hanf | 1,45 | 0,6 | 70 | 1,6 |

faser) und eine hohe Festigkeit bei kleiner Dichte. Bedingt durch den hohen Preis (Faktor zehn zu Glas) sind Kohlenstofffasern vor allem in „Hightech“ Anwendungen zu finden. Die geringe Dichte und die hohe Zugfestigkeit sind die Hauptmerkmale der Aramidfaser. Ihre Anwendung ist wie bei der Kohlenstofffaser durch den Preis beschränkt. Naturfasern sind vor allem als ungerichtete Verstärkungen in nicht tragenden Teilen in der KFZ Industrie zu finden [FZR95]. Für technisch hochwertige Erzeugnisse (Luft- und Raumfahrt, Segel- und Motorsport, Militär) werden

Prepregs, vorgetränkte Faserverstärkungen, verwendet. Diese zeichnen sich durch einen sehr hohen und genauen Faservolumenanteil, durch eine einfache Handhabung und eine sehr präzise Fertigung aus. Dies geht einher mit einem hohen Preis und, bedingt durch das Matrixsystem (Harz und Härter sind schon gemischt und heißhärtend), einer teuren (zeitlich begrenzten) Lagerung und einer aufwändigen Formgebung und Härtung bei hohen Temperaturen und hohem Druck. Die gängigen hier näher beschriebenen Fasern zeichnen sich durch einen nahezu linearen Spannungs-Dehnungs-Verlauf (bis auf Aramid- und Naturfasern) aus.

2.1.1 Steife Matrices für FKV

Als gängige Matrixmaterialien für faserverstärkte Werkstoffe sind thermoplastische und duroplastische Polymere, Keramiken oder auch Metalle im Gebrauch. Für diese Arbeit spielen alle Matrixmaterialien, außer den Polymeren, eine untergeordnete Rolle und werden hier nur der Vollständigkeit halber aufgeführt. Schwerpunktmäßig wird hier ein Überblick über die derzeit in der Industrie verwendeten Kunststoffmatrices und deren Interphasenverhalten gegeben.

Als Material für die Matrix eines FKV kommen die verschiedensten Polymere zum Einsatz. Welches Matrixsystem gewählt wird, hängt von den gewünschten mechanischen, thermischen, elektrischen und brandtechnischen Eigenschaften und von den vorgesehenen Fertigungsverfahren ab. Duomere nahmen und nehmen hierbei die Vorreiterstellung ein. Seit den sechziger Jahren werden sie in FKV eingesetzt. Neuer ist die Verwendung von Thermoplasten und Elastomeren. Durch den zeitlichen Vorsprung der Duroplaste ist die Verarbeitung von beispielsweise Epoxid- und Polyesterharzen um ein Vielfaches ausgereifter. Aber neue Anforderungen an die Recyclingfähigkeit ebenso wie verbesserte mechanische Eigenschaften rücken die Thermoplaste allmählich in den Vordergrund.

Eine der verbreitetsten Duroplastmatrices für FKV sind ungesättigte Polyester Harze. Diese sind niedermolekular und kalthärtend. Die Vernetzung mit Peroxiden erfolgt engmaschig zu dreidimensionalen Netzwerken, siehe Abbildung 5. UP sind unlöslich, klar, stark klebend, hart, spröde und relativ günstig [HHH04].

Etwas hochwertiger und teurer sind Epoxidharze. Sie zeichnen sich durch geringen Härtschwund, gute Haftung und gute chemische Beständigkeit aus. Ein großer Vorteil ist die Härtung ohne Abspaltung flüchtiger Substanzen. Duroplaste und vor allem Epoxidharze können durch Additive in ihren Eigenschaften stark verändert werden. Ein solcher Zusatz sind Weichmacher, welche die Steifigkeit und Bruchdehnung herab- bzw. heraufsetzen. Dazu mehr im folgenden Kapitel.

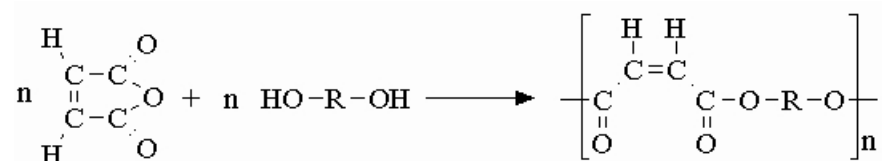


Abbildung 5: Reaktion von Säureanhydriden mit Diolen zu UP-Harz [Häb03]

2.1.2 Nachgiebige Matrices für FKV

Zwar wurden und werden Gummis und Elastomere mit Fasern und anderen Komponenten verstärkt, wie in KFZ-Reifen, Förderbändern und Keilriemen, aber diese Verstärkungen sind lokal. Es wird aber kein neuer Verbundwerkstoff, sondern ein Bauteil mit Verstärkungskomponenten erzeugt. Diese Art von Konstruktionen werden in der Literatur nicht als eigenständiger Werkstoff sondern als „verstärkte Elastomerprodukte“ angesehen. Eine Alternative dazu ist die Verwendung von faserverstärkten Elastomer matrices, in der Literatur „faserverstärkte Kunststoffe mit Elastomer matrix (E-FKV)“ genannt. Hier kombiniert sich die Festigkeit der Verstärkungsfasern mit der Flexibilität der Elastomer matrix zu einem neuartigen Verbundwerkstoff. An der RWTH Aachen wurden im Jahr 2000 von *Koschmieder* [Kos00] Untersuchungen, welche das große Potential, d.h. die niedrige Steifigkeit und die hohe Festigkeit von E-FKV bestätigen, durchgeführt. Dabei wurden vor allem anwendungsbezogene Versuche sowohl mit Duroplasten als auch mit Elastomeren gemacht. Als Ergebnis steht die Anwendbarkeit von Elastomeren als Matrixmaterial für FKV. Für die Verarbeitung von Elastomer Matrices konnte nachgewiesen werden, dass gängige FKV-Herstellungsverfahren nur leicht geändert und an die meist hohe Viskosität angepasst werden müssen. Gleichzeitig wurde die Faser-Matrixhaftung untersucht und von 12 Materialkombinationen die mechanischen Eigenschaften ermittelt. Es konnte bei zäh-harten Matrices eine ähnliche Festigkeit wie bei herkömmlichen FKV und trotzdem eine höhere Bruchdehnung ermittelt werden. Die Arbeit [Kos00] zeigt das große Potential von nachgiebigen FKV deutlich.

Nachgiebige Duroplaste

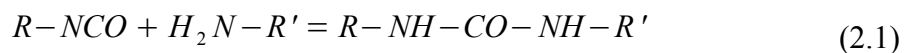
Es gibt heutzutage verschiedene Möglichkeiten Duroplaste flexibel zu gestalten. Der Zusatz von Additiven, den so genannten Weichmachern, ist der einfachste Weg. Hierbei gibt es zwei Ansätze: Äußere und Innere Weichmachung.

Als äußere Weichmacher dienen hochsiedende Ester der Phthalsäure, Phosphorsäure, Adipin- und Sebacinsäureester sowie spezielle Fettsäureester. Dies sind schwerflüchtige Flüssigkeiten, deren Moleküle durch Nebenvalenzen an die Kunststoffmoleküle gebunden werden. Die Weichmacher werden eingeknetet oder den Lösungen beigemischt. Sie senken die Kräfte zwischen den Makromolekülen und setzen dadurch die Erweichungstemperatur herab. Damit erhöht sich die Flexibilität der Kunststoffe. Nachteilig sind das Ausschwitzen des Weichmachers und die Weichmacherwanderung auf andere, den behandelten Kunststoff berührende Materialien. Das Abdichten des Kunststoffes mit einer Acrylharzschicht kann dies verhindern, doch verringert es auch die Bruchdehnung. Es können auch höher siedende Phethalsäuren, z.B. Dioctylphthalat (DOP), Diisononylphthalat oder gar Diisotridecylphthalat, verwendet werden. Dies verlangsamt das Ausschwitzen, kann es aber nicht verhindern. Außerdem nehmen bei solchen Kunststoffen die chemische Beständigkeit ab und die Entflammbarkeit zu. Eine weitere Versprödung entsteht durch das Auswaschen der Weichmacher durch wässrige Lösungen und organische Lösungsmittel. Die flüchtigen Bestandteile sind nicht lebensmittelecht und gesundheitsschädlich. Diese Punkte machen den Lösungsansatz der äußeren Weichmachung für dauerhaft flexible Matrices ungeeignet [Klo05]. Frühere nicht dokumentierte Versuche des Arbeitsbereichs „Spannungsop-

tik“ der Fakultät Maschinenbau und Schiffstechnik an der Universität Rostock mit Dibuthylphthalat als Weichmacher für Epoxidharz ließen einen hochflexiblen Prüfkörper entstehen, welcher aber innerhalb kurzer Zeit versprödete.

Die zweite Möglichkeit ist die innere Weichmachung der Duomere mit Katalysatorsystemen. Die Firma Bakelite vertreibt einen Katalysator, welcher in Epoxidharzen einsetzbar ist. Dieser Zusatz ist ein komplizierter metallorganischer Komplex, der bei einer steuerbaren Temperatur zerfällt und den eigentlichen Katalysator freisetzt. Der Komplex wird bei Raumtemperatur dem EP beigegeben und ab einer Temperatur von ca. 80°C aktivieren sich alle Katalysator-Moleküle. Durch die homogene Verteilung kommen die chemischen Reaktionen an sehr vielen Stellen parallel in Gang. Der verbleibende Rest des Katalysators stört die Vernetzung nicht, denn das Molekül wird in die Polymerketten eingebaut und die Netzwerkdicke wird noch besser. Das Epoxidharz wird homopolymerisiert und die Zugabe anderer Härterstoffe entfällt völlig. Der weich gemachte Duroplast ist wesentlich flexibler [Hof91]. Solche nachgiebigen Duroplasten kommen als Bodenbelag und Beschichtungen zum Einsatz. Teilweise sind sie kurzfaserverstärkt, um den Abrieb zu vermindern [RuG05].

Polyurethane (PUR) sind eine der am vielseitigsten einsetzbaren Kunststoffgruppen, was auf einer Reihe von chemischen und anwendungstechnischen Besonderheiten basiert. Diese Besonderheiten bedeuten aber auch, dass PUR nicht einwandfrei einer Stoffklasse zuzuordnen sind. Es gibt sowohl thermoplastische als auch duroplastische Polyurethane. Es gibt sie als kalthärtende Systeme, als gießfähige Diisocyanato-toluol (TDI) oder Diisocyanato-diphenylmethan (MDI) Systeme, als PU-Schäume, als zäh-harte Giesmassen und als nachgiebig-elastische Gieselastomere [Bec73]. Außerdem werden sehr widerstandsfähige Lacke und Beschichtungen auf Polyurethanbasis hergestellt [Boc99]. Im Sinne von FKV sind die den EP- und UP-Harzen ähnlichen zäh-harten Systeme und in dieser Arbeit die nachgiebig-elastischen Gieselastomere von Bedeutung. Gießfähige Polyurethane entstehen durch die Polyaddition von Isocyanaten, meist TDI oder MDI, mit Aminen zu Harnstoffen [ViH66].



Bei der Polyaddition verbinden sich Moleküle von zwei unterschiedlichen Stoffen zu sehr großen Molekülen, wobei Atome ihren Platz wechseln, ohne dass hierbei ein Stoff abgespalten wird.

Die zwei Reaktionskomponenten werden in einem genau abgestimmten Mischungsverhältnis benötigt. Die Reaktion läuft nur oberhalb einer gewissen Temperaturschwelle von selbst ab und kann durch Abkühlen unter diese Temperaturschwelle eingefroren werden. Diese genaue Steuerbarkeit der chemischen Reaktion ist der Hauptvorteil der Epoxid-, Polyester- und Polyurethanharze in Bezug auf die Verarbeitung. Um gängige Herstellungsverfahren für FKV verwenden zu können und so in den Experimenten eine Praxis- und Anwendungsnähe zu wahren, sind folgende Kriterien zwingend für die Wahl der Matrix:

1. Möglichst niedrige Viskosität – gute Fasertränkung und Benetzung
2. Gutes Fließverhalten und Kapillarwirkung – hoher Faseranteil, wenig Einschlüsse
3. Später Gelpunkt - lange Verarbeitungszeit
4. Niedrige Vernetzungstemperatur – einfacherer Fertigungsprozess
5. Faser-Matrix-Haftung

Basierend auf den Untersuchungen von *Koschmieder* [Kos00] wurde für die Herstellungs- und Werkstoffversuche eine mittelharte, kalt härtende, duroplastische Polyurethanmischung gewählt. Hierbei wurde der TDI-Prepolymer Airthane PPT80A mit dem aromatischen Aminvernetzer Ethacure300 stöchiometrisch nach der 95% Theorie gemischt, [Alb99].

Elastomere und Silikone

Elastomere oder elastische Kunststoffe (Gummiwerkstoffe) werden häufig nicht zu den Kunststoffen gezählt, obwohl sie überwiegend ebenfalls synthetisch hergestellt werden. Sie bestehen meist aus weitmaschig vernetzten Kettenmolekülen (Hauptvalenzbindungen). Elastomere sind bei tiefer Temperatur ($T < T_G$) hartelastisch und im Gebrauchsbereich ($T > T_G$) weichelastisch/gummielastisch. T_G ist dabei die Glas temperatur (auch: Einfriertemperatur), welche den Übergang vom Glaszustand in den Übergangsbereich markiert (siehe unten). Elastische Kunststoffe sind unlöslich aber quellbar und nicht schmelzbar. Generell stellt ihre Verarbeitung grundlegend andere Ansprüche an die Technik als die Verarbeitung der anderen Kunststoffe. Thermoplastische Elastomere (TPE) sind Thermoplaste (Copolymerisate oder Blends) mit überwiegenden „Weichanteilen“ im gummielastischen Zustand, eingebunden in eine amorphe oder teilkristalline Grundmasse. Sie verhalten sich aufgrund ihres molekularen Aufbaus ähnlich wie Elastomere. Sie schmelzen aber, dank ihrer physikalischen Vernetzung, unter Wärmeeinwirkung, was einerseits bei der Formgebung von Vorteil ist, aber andererseits den Einsatz bei hohen Temperaturen begrenzt. Diese Schmelzbarkeit ermöglicht eine ähnliche Verarbeitung wie die der Thermoplaste.

Silikone sind hochmolekulare Verbindungen mit Siliziumketten und mit organischen Seitengruppen. Sie kommen vor als hochvernetzte Duroplaste oder Elastomere, [Klo05]. Durch die meist hohe Viskosität ist die Tränkung von Faserverstärkungen schwierig. Zum Einsatz kommen ein einkomponentiges und ein zweikomponentiges kalthärtendes hochviskoses Silikon von Wacker Chemie, [Wac06].

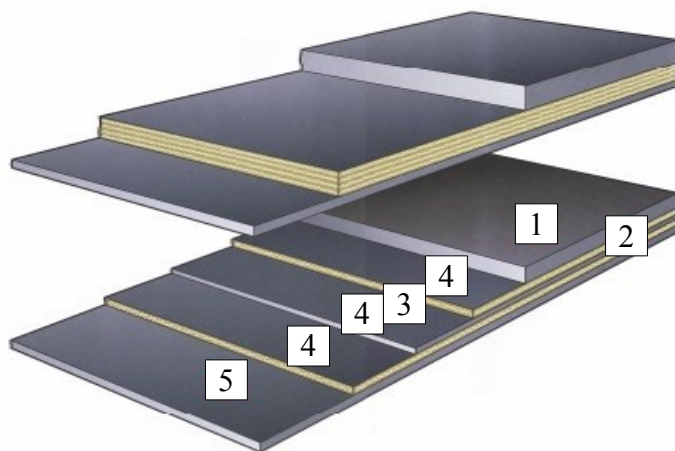
2.1.3 Anwendungen von nachgiebigen FKV

Verstärkte nachgiebige Kunststoffe, ob nun Duroplasten, Gummi, Silikone oder TPE, gibt es in vielen technischen Bereichen. Am bekanntesten ist die textile und vielschichtige Verstärkung von Kraftfahrzeugreifen. Wie in Abbildung 6 gezeigt wird, kann hier aber nicht von einem FKV-Werkstoff gesprochen werden, sondern eher von einer Schichtkonstruktion verschiedener Werkstoffe, welche zusammen vulkanisiert werden. Es gibt sowohl reine Gummischichten als auch reine Verstärkungsschichten.



Abbildung 6: Reifenaufbau mit Werkstoffschichten [www.kiswire.com]

Ein weiteres großes Anwendungsfeld für nachgiebige und verstärkte Kunststoffkonstruktionen sind Riemen und Förderbänder. Dieser Bereich umfasst Gewebegurte, Stahlseilgurte, Aramidgurte, Gurte mit Stollen und Wellenkanten sowie PVC- und PU-Gurte für Förder- und Antriebssysteme. Auch diese Bauteile sind keine nachgiebigen verstärkten Werkstoffe, sondern flexible Schichtkonstruktionen. Sie bestehen aus Deckschichten, Verstärkungslagen und Haftlagen. Der für die Deckplatte verwendete polymere Basiswerkstoff variiert mit den erforderlichen Eigenschaften. Styrol-Butadien- oder Naturkautschuk werden beispielsweise für verschleiß- und abriebfeste Deckplatten verwendet, Butyl- oder Ethylen-Propylen-Kautschuk bei geforderter Hitze-



Aufbau

1. Deckplatte Tragseite
2. Karkasse
3. Gewebelage
4. Haftgummi- (Skim-) schicht
5. Deckplatte Laufseite

Abbildung 7: Textilgurtaufbau [MeM02]

beständigkeit. Gummi auf Basis von Chloropren-Kautschuk ist schwer entflammbar, Nitrilkautschuk ist ausgezeichnet beständig gegen Öl und Fett. Spezielle Gurte mit profilierten Oberflächen oder mit Stollen sind für geneigte oder steile Förderanlagen erforderlich. Die Dicke der Deckplatte ist von den Eigenschaften des transportierten Materials und den Bedingungen bei der Beladung abhängig. Der Zugträger besteht aus einem synthetischen EP-Gewebe. Dessen in Längsrichtung liegende Fäden (Kettfäden) bestehen aus Polyester (E), die in Querrichtung laufenden Fäden (Schussfäden) aus Polyamid (P). Dieses Gewebe gewährleistet ein gutes Verhältnis von Zugfestigkeit zu Gewicht, ausgezeichnete Flexibilität und Muldungsfähigkeit, niedrige Dehnung, hohe Beaufschlagungsfestigkeit und gute chemische Beständigkeit. Aufgabe der Haftschichten ist die gute Verbindung von Gewebelagen und Deckplatten. Außerdem übertragen und verteilen sie die Spannungen zwischen den Gewebelagen [MeM02]. Insgesamt sind Gurte mög-

lichst steif und nicht reckbar zu bauen, wobei vorgespannte Systeme oder unwuchtabsorbernde Gurte eine gewisse Dehnbarkeit haben müssen.

Elastische verstärkte Kunststoffe finden sich auch in Feder - Dämpfersystemen wieder. So sind Gummilager aus einem KFZ kaum wegzudenken. Auch als Werkstoff für Hubbälge oder pneumatische Muskel sind E-FKV dank ihrer besonderen Eigenschaften einsetzbar. Das Wirkprinzip der sich gegeneinander verschränkenden Fasern im sich dehnenden Muskel ist bei *Koschmieder* [Kos00] gut beschrieben und in Abbildung 8 schematisch dargestellt.

In Antriebselementen kommen bedingt durch die gute Schwingfestigkeit und die hohen spezifischen mechanischen Eigenschaften FKV vermehrt zum Einsatz. Gerade bei Wellen sind oft elastische Kupplungen zur Eliminierung von Fluchtungsfehlern und Stößen nötig. Hier können, wie schon bei *Koschmieder* [Kos00] gezeigt, E-FKV als Integralbauteile zur Anwendung kommen. Ähnliche Versuche wurden zur Vorbereitung dieser Arbeit durchgeführt und der in Abbildung 8 gezeigte Wellenprototyp gewickelt. Hierbei wurde ein Glasfaserveroving abwechselnd in Epoxidharz und Silikon getränkt. Die Welle ist in der Mitte flexibel und Kräfte können über die festen Epoxidenden eingeleitet werden. Des Weiteren ist die Welle flüssigkeitsdicht und bietet eine gewisse Flexibilität bei der Montage.



Abbildung 8: *Pneumatischer Muskel [Fes06], gewickelte FKV Welle mit flexibler Mitte*

Seit einigen Jahren werden neue Materialien untersucht, deren Eigenschaften sich bei geeigneter Steuerung oder Regelung den Umgebungsbedingungen anpassen. Solche Strukturen werden als adaptiv bezeichnet. Ihre Anwendungen, vor allem im Bereich Luft- und Raumfahrt, aber auch darüber hinaus, verfolgen das Ziel der Einsparung von Bauteilen und Umsetzung der Integralbauweise. Nachgiebige FVK mit spezifischen mechanischen Eigenschaften könnten hier neue Möglichkeiten bieten, indem sie definierte Dehnungen zulassen und/oder Bewegungen definieren [BaK82].

2.2 Faserwelligkeit in biologischen Geweben

Die Faserverstärkung ist wie bei vielen technischen Prinzipien keine Idee des Menschen, sondern ist der Natur, ob bewusst oder unbewusst, nachempfunden. Natürliche Materialien wie Holz, Bambus und Horn sind faserverstärkte Verbundwerkstoffe. Als Verstärkungsfasern wirken hier Cellulose- und Kollagenfasern. Meistens sind diese im Sinne der optimalen Fasereigenschaftsnutzung in Belastungsrichtung orientiert. Cellulosefasern sind in einer hohlen wabenförmigen Stützstruktur angeordnet und ergeben den Werkstoff Holz, Abbildung 9.

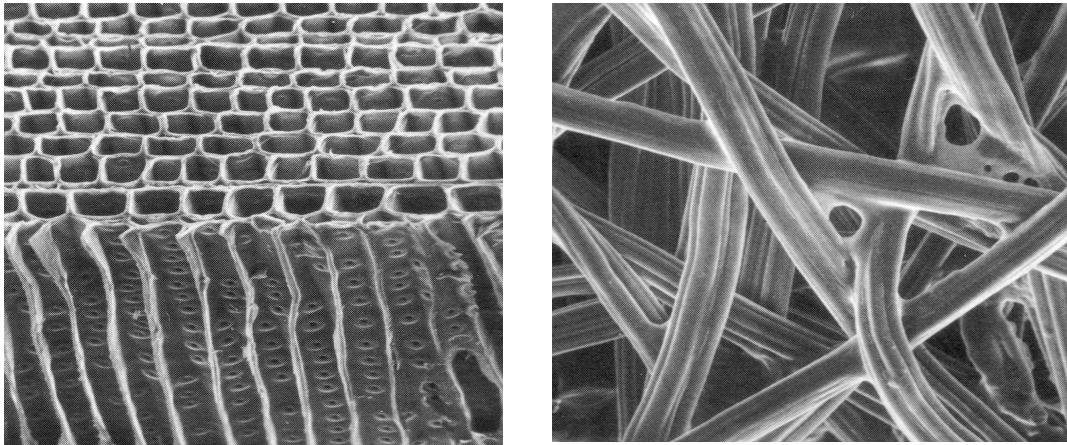


Abbildung 9: Verbundwerkstoff Holz, Wabenstruktur und Cellulosefasern [Gor89]

Holz ist als fester Körper nur begrenzt elastisch verformbar und kommt in der Natur auch nur bei wenigen Lebewesen vor. Die große Masse der Pflanzen und Tiere ist aus nachgiebigen Geweben aufgebaut. Alle nicht verholzten Pflanzen, ob nun Gräser, Blätter oder Algen, sind sehr flexibel und begegnen Belastungen nicht mit Steifigkeit, sondern mit Dehnung – sie geben nach und die auftretenden Spannungen sind, verglichen mit technischen Gebilden, klein. Da sich eine solche hoch flexible Struktur prinzipiell von heutigen steifen technischen Konstruktionen unterscheidet, sollen hier nur Dehnungen im Bereich bis 20 %, was weit über den üblichen 1-2 % der meisten technischen Konstruktionen liegt, betrachtet werden. In Abbildung 10 sind drei qualitativen Spannungs-Dehnungs-Kurven für einen gummielastischen Polymer (Dehnungen bis 600 %), ein nachgiebiges biologisches Gewebe (Dehnungen bis 100 %) und ein fester Ingenieurwerkstoff (Stahl C45 mit einer Bruchdehnung von 16 %) dargestellt. Die mechanischen Eigenschaften von biologischen Geweben sind nicht eindeutig definierbar, hier ist die Streuung in Abhängigkeit von Entnahmeort, Alter und Prüffart des Gewebes sehr hoch. Aus diesem Grund schwanken die Anga-

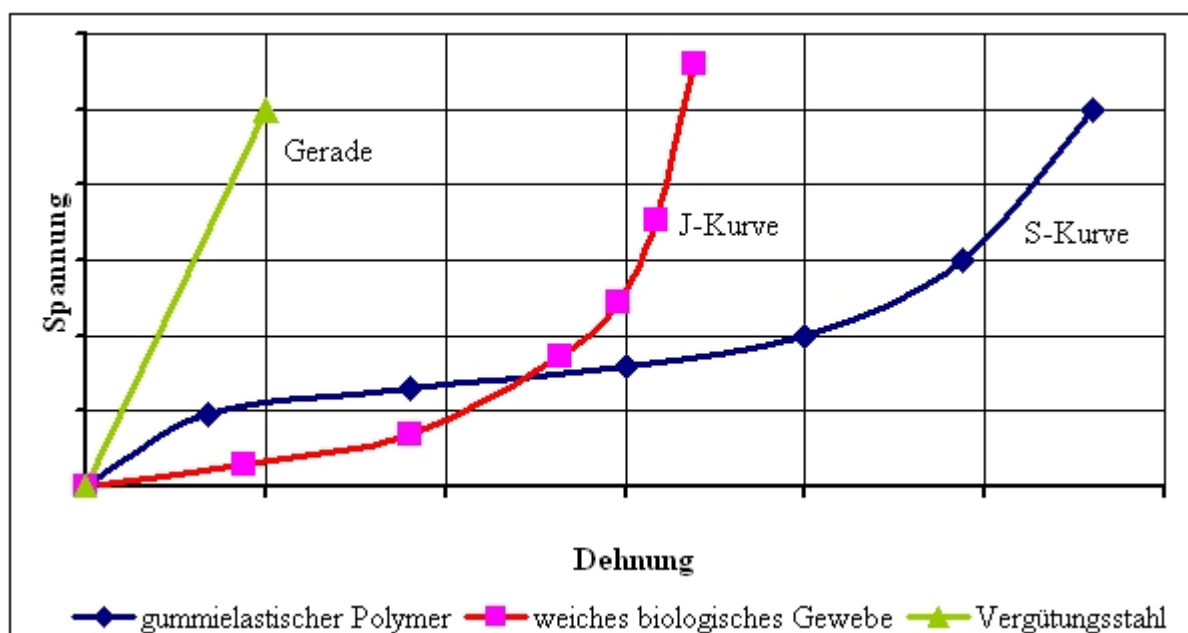


Abbildung 10: Schematischer Vergleich des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von einem gummielastischen Polymer, biologischem Gewebe und Vergütungsstahl, [Gor89]

ben in der Literatur ([Gor89], [Bar02], [OSc88], [Par84]) entsprechend und sind in Tabelle 2 gegenübergestellt.

2.2.1 Natürliche Sehnen

Die dem J-förmigen Spannungs-Dehnungs-Verlauf (im folgenden kurz „J-Kurve“ genannt) biologischer Materialien zugrunde liegenden Mechanismen sind nur in ihrer allgemeinen Art bekannt und unterscheiden sich in vielen Einzelheiten enorm. *J. E. Gordon* beschreibt die Vorteile einer J-Kurve als hohe Zähigkeit und geringe Neigung zur Aneurismenbildung [Gor89]. Die J-Kurve gliedert sich in zwei Teile. Der erste Kurventeil lässt sich durch verknäulte Fasern bzw. verknäulte Kettenmoleküle erklären. Diese strecken sich bei Belastung und erlauben im gestreckten Zustand nur noch kleine Dehnungszunahmen. Diese Eigenschaft wird durch das Kollagen bestimmt. Kollagen ist ein fibröses Protein aus langen Polypeptidketten, welche sich zu Fasern, Fibrillen und Fibrillenbündeln kombinieren. Vor allem Sehngewebe zeigt die als J-Kurve beschriebenen Eigenschaften deutlich, da es fast aus reinem Kollagen besteht und die Fibrillen eine gleichmäßige Längsorientierung (in Krafrichtung) haben. Besonders ist dabei, wie in Abbildung 11 zu sehen, dass die Kollagenfibrillen wellig parallel liegen und sich unter Belastung strecken. Sehnen mit ihrem faserigen Aufbau haben eine Hauptbelastungsrichtung (Zug in Faserrichtung) und setzen Druck und Scherung wenig entgegen. In der Literatur werden daher zur Beschreibung dieses nicht linearen Verhaltens neben den Spannungs-Dehnungs-Kurven auch die Tangentenmoduln (E_t) zur Beschreibung des Gewebes angegeben.

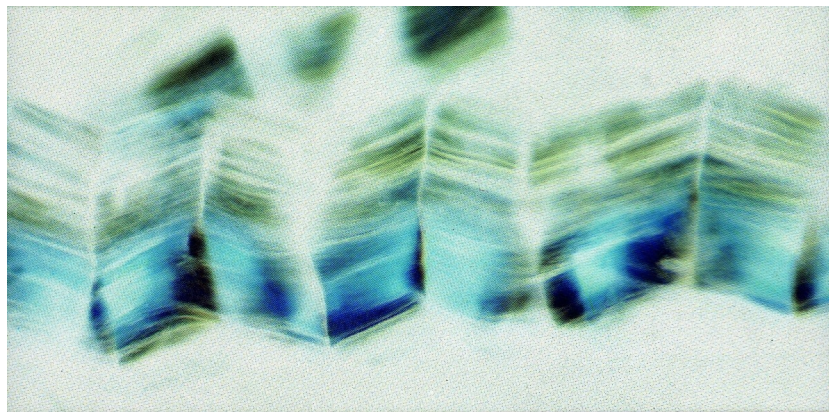


Abbildung 11: Kollagenfibrille mit Wellung (Negativaufnahme) [Gor89]

Der Tangenten-E-Modul ergibt sich aus dem Anstieg der Spannungs-Dehnungs-Kurve:

$$E_t = \frac{d\sigma}{d\epsilon} \quad (2.2)$$

Sehnen sind relativ steif und haben eine relativ hohe Bruchdehnung ($\epsilon_{\max} = 6 - 20 \%$). Sie übertragen die Kräfte zwischen Muskel und Knochen und speichern extrem hohe Dehnungsenergien. Diese Eigenschaft ähnelt der einer Feder und ermöglicht zum Beispiel die beachtlichen Sprünge von Katzen und Affen. Die Menschen machten sich Sehnen daher beim Bogen- und Armbrustbau zu Nutze. In Tabelle 2 sind die wichtigsten mechanischen Kenngrößen für Haut und Sehnen

denen wichtiger technischer Werkstoffe gegenübergestellt. Da die Angaben zu den biologischen Werten weit streuen und Einzelwerte bei stark nicht linearem Steifigkeitsverhalten nicht aussagekräftig sind, wurden verschiedene Quellen zitiert. Im Vergleich zu den nachgiebigen biologischen Materialien sind die klassischen technischen Werkstoffe (zum Beispiel Aluminium oder Stahl) um Größenordnungen fester und steifer.

Tabelle 2: Eigenschaften von biologischen und technischen Materialien

| Material | E-Modul (MPa) | Zugfestigkeit (MPa) | Poisson- Verhältnis | Maximale Dehnung [%] |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Haut [Par84] | 50 | 8 | 0,49 | 100 |
| Sehne [OSc88] | 1500 | 70 | 0,4 | 10 |
| Sehne [Bar02] | 300 - 2000 | 24 - 61 | --- | 6 – 20 |
| Sehne [Par84] | 1000 | 53 | --- | 9,4 |
| Sehne [Loh05] | 100-1200 | 50 - 100 | --- | 4 – 10 |
| Aluminium ALMg3 [Fri88] | 70000 | 190 - 305 | 0,33 | 20 |
| Stahl C45 [Fri88] | 210000 | 650 - 800 | 0,28 | 16 |
| FVK P-ES [Mos92] V_f=0,45 (Epoxi+E-Glas) | 38600 | 1062 | 0,26 | 3 |
| FVK G-ES [Mos92] V_f=0,5 (Epoxi+E-Glas) | 23000 | 388 | 0,15 | 4 |
| PUR Airthane [APC04] | 4,8 – 6,2 | 16,5 | 0,5 | > 500 |
| N-FKV 20PU 65x7 V_f=0,33 (PU / E-Glas) | 700 – 4500 nicht konstant | 180 | --- | 9,1 |
| N-FKV 20PU 65x7 V_f=0,18 (PU / E-Glas) | 385 – 2475 nicht konstant | 99 | --- | 9,1 |

Die untersuchten N-FKV (20PU) weisen dagegen den biologischen Materialien sehr ähnliche Werkstoffeigenschaften auf, wobei der Faservolumenanteil, die Halbzeugwahl und das Welligkeitsverhältnis die entscheidenden Rollen in Bezug auf die Steifigkeit spielen. Das Welligkeitsverhältnis ist eine charakteristische Größe für nicht gestreckte Fasern und ist als Quotient

$$\text{Welligkeitsverhältnis} = \frac{a}{\lambda} \quad (2.3)$$

definiert. Hierbei ist a die Amplitude und λ die Wellenlänge der gewellten Faser. Wie zu Abbildung 10 erläutert, ist es sinnvoll zwei Bereiche um die signifikanten Zug-Tangentenmodule anzugeben und das nichtlineare Werkstoffverhalten darzustellen. Die Berechnung von biologischen Geweben ist ein Schwerpunkt der Biomechanik und es sind zahlreiche Publikationen zu finden.

Aufgrund der Bandbreite biologischen Gewebes und den daraus resultierenden sehr verschiedenen mechanischen Eigenschaften hat sich die Forschung in den letzten Jahren auf die Finite-Elemente-Methode konzentriert. *Contro und Vena* geben in ihrer Arbeit [CoV02] einen Überblick über den Einsatz der FEA in Bezug auf biologische Gewebe. Wesentliche Vorteile der FEA sehen sie in der Möglichkeit, die umfangreichen medizinischen Randbedingungen (Patientendaten, Alter, Geschlecht), die biologische Komplexität (Interaktion von Körpersubsystemen) und die ungewöhnlichen klinischen Ausgangsdaten (Geometrie und Lasten) zu erfassen und auszuwerten. So dienen sowohl empirisch ermittelte Körpermaße als auch CT-Daten als geometrisches Modell und können mit CAD-Prothesen kombiniert werden. Belastungsanalysen zeigen hier die Interaktion von realem Knochen und geplanter Prothese. Bei der Berechnung von nachgiebigen Geweben mit großer Dehnbarkeit kommen werkstofflich nicht lineare Berechnungsmodelle zum Einsatz und am gezeigten Beispiel der künstlichen Sehne wurde das mechanische Modell eines

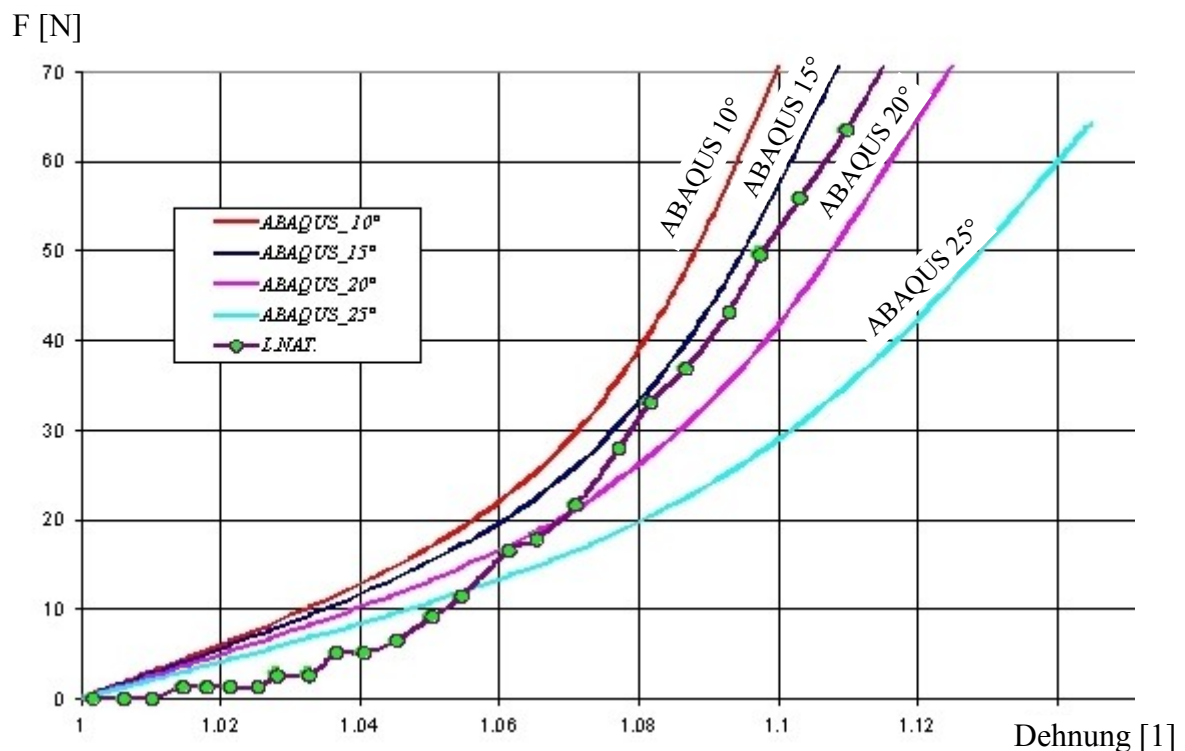


Abbildung 12: Kraft-Dehnungs-Verlauf von Sehne (LNAT) und FEA (ABAQUS), [CoV02]

Komposites genutzt, um die Eigenschaften der natürlichen Sehne nachzubilden. Die Resultate sind in Abbildung 12 gezeigt, wo die numerischen Ergebnisse (Abaqus) mit verschiedenen Faserwinkeln mit den Ergebnissen des Zugversuches einer natürlichen Sehne (L.Nat) verglichen werden.

Neben den numerischen Ansätzen gibt es die Möglichkeit, das mechanische Verhalten einer Sehne mit Hilfe von biomechanischen Modellen zu erfassen. Diese Modelle stellen die Sehnenspannung in Abhängigkeit zur Sehnendehnung dar. Hierbei wird das Hook'sche Gesetz für lineares Werkstoffverhalten an das nicht lineare, fast parabolische, mechanische Verhalten von Sehnen-gewebe angepasst [KCH00]. Hier gilt:

$$\sigma = E_s \cdot \epsilon^n \quad (2.4)$$

wobei E_s der empirisch ermittelte E-Modul der Sehne und n eine empirisch ermittelte Konstante ist. Basierend auf Formel (2.4) und der Auswertung der entsprechenden Literatur definieren *Klute et al.* [KCH00] für die Achillessehne

$$\begin{aligned} 5773 \text{ MPa} &\leq E_s \leq 27614 \text{ MPa} \\ n &\approx 2 \end{aligned} \quad (2.5)$$

als Zielvorgaben für künstliches Sehnengewebe.

Des weiteren wird das EST Modell (Energy-Storing-Tendon) vorgestellt. Hier ergeben sich $E_s=10289 \text{ MPa}$ und $n=1,91$ aus gesammelten Werten von Tiersehnenversuchen. Der Vergleich der gesammelten Spannungs-Dehnungs-Kurven ist in Abbildung 13 zu sehen.

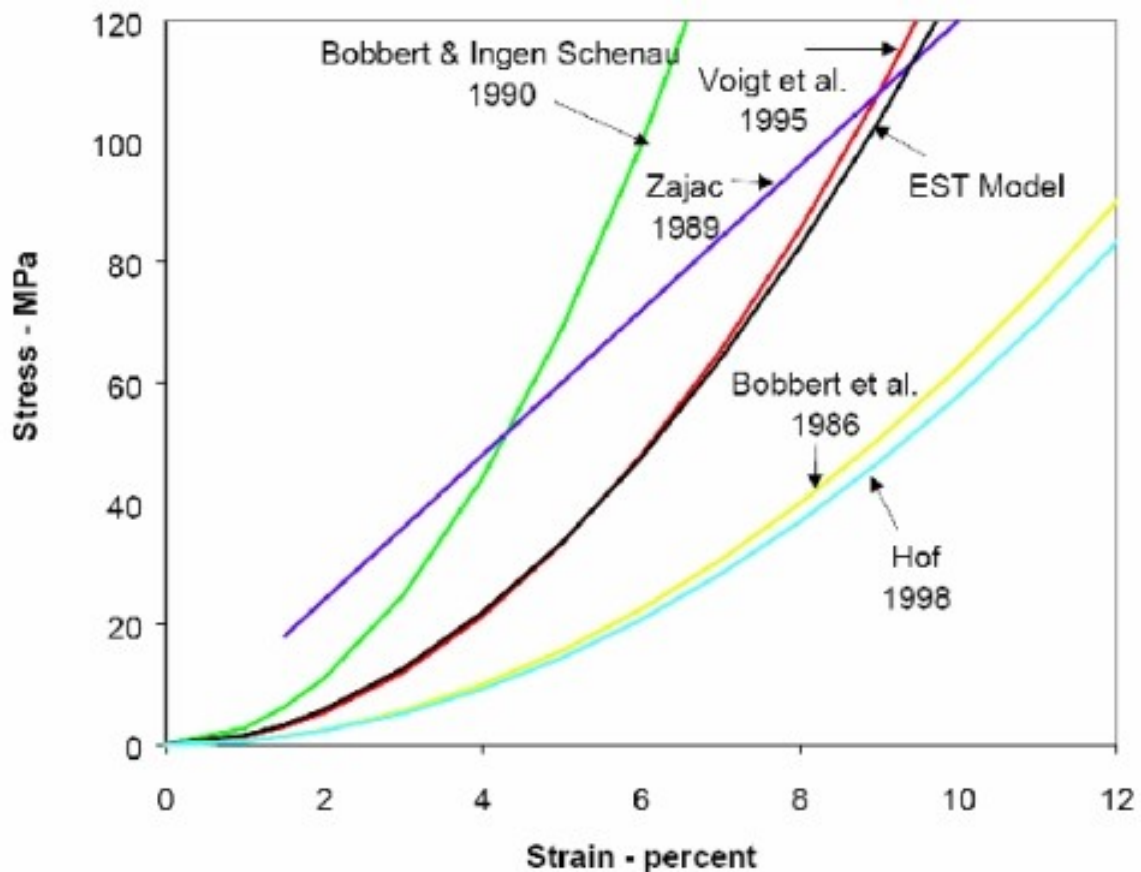


Abbildung 13: Verschiedene biomechanische Modelle zur Beschreibung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens der Achillessehne [KCH00]

2.2.2 Künstliche Sehnen

Aus medizinischer Sicht sind vor allem der Ersatz geschädigter Sehnen und die möglichst genaue Eigenschaftsnachbildung durch die künstliche Sehne wichtig. Natürlich stehen hier die Biokompatibilität, die Optimierbarkeit und die Haltbarkeit der Sehne im Vordergrund. Künstliche Seh-

nen werden schon seit Beginn des 20. Jh. beim Menschen eingesetzt, nur waren die ersten Seiden-Sehnen nur bedingt haltbar. In den 70er Jahren wurden erste Kunststoffsehnen operiert und auch Kohlenstofffasern kamen zum Einsatz. Nach Erickson [Eri02] sind vor allem hydrogelepolymer Matrices mit eingebetteten kollagenähnlichen Fasern aus PET, PBO oder PGA im Einsatz. Diese haben einen dämpfenden Effekt bei plötzlicher Muskelbelastung. Strukturell sind diese Verstärkungen gesponnen, gewebt, gestrickt oder der natürlichen Kollagenorientierung nachempfunden. Dieser Verbund besitzt eine hohe Festigkeit und Zähigkeit. Biologische Systeme werden durch Alterung und Unfälle oft geschädigt, weshalb es vielschichtige Bestrebungen gibt geschädigte Strukturen zu ersetzen. Vor allem der Gelenkersatz in den Gliedmaßen ist durch intensive Forschung weit fortgeschritten. Endoprothesen, Implantate und Inserts für Hüfte und Knie sind im chirurgischen Einsatz. nachgiebige tragende Strukturen wie Sehnen und Bänder werden seltener implantiert und der Einsatz ganzer künstlicher Sehnen wird momentan aus medizinischer Sicht kritisch betrachtet. Dabei sind Sehnen und Bänder durch ihre schlechte Regeneration und langsame Heilung prädestiniert für künstliche Hilfen. Synthetische Biomaterialien sind UHMW-PE, PP, PET, PTFE, PU, Aramidfasern, Kohlenstofffasern und künstliche Kollagenfasern. Trotz vieler neuer Entwicklungen sind die Dauerfestigkeit und Biokompatibilität der eingesetzten Polyethylen- und Polyethylenterephthalatimplantate nicht befriedigend, [RHK04]. Gleiches gilt für die modellhafte Nachbildung von Gelenken in Gliedmaßenprothesen, medizinischen Prüfständen und humanoiden Robotern, da hier noch kein passender Ansatz gefunden wurde [Sch05]. *Klute et al.* [KCH00] beschreiben das Hauptproblem bei der Modellierung einer künstlichen Sehne als Kompromiss zwischen Gewicht (weight penalty) und Leistung (performance). Die von ihnen konstruierte künstliche Sehne soll die Eigenschaften der menschlichen Achillessehne nachbilden und in einer angetriebenen Beinprothese eingesetzt werden. Hierbei sollen wie in der Natur sowohl Kräfte übertragen als auch Energie gespeichert werden. Für die Konstruktion einer künstlichen Sehne ist es unabkömmlich, neben den mechanischen Eigenschaften die Rahmenbedingungen, vornehmlich Querschnitt und Länge zu kennen. Für die Achillessehne ermittelten sie basierend auf einer breiten Literaturrecherche eine durchschnittliche Querschnittsfläche von 65 mm^2 und eine Durchschnittslänge von 363,5 mm. Die experimentelle Nachbildung dieser Sehne wurde mit Hilfe zweier versetzter paralleler Spiralfedern erreicht. Hierbei wurde der Kurvenverlauf der Achillessehne durch einen einfach geknickten linearen (bi-linear) Kurvenverlauf der Federn ersetzt. Die Annäherung an die natürliche Kurve wird durch den Einsatz von weiteren Federn genauer, wobei hier die Grenzen von Masse und Platz eingehalten werden müssen. Die experimentellen Ergebnisse sind befriedigend, doch schlagen *Klute et al.* die Entwicklung von leichten nicht linearen Kunststofffedern vor.

Diesen Schritt haben *Iannace et al.* wie in [ISA95] beschrieben schon 1995 getan. Hier wurde die Achillessehne von Kaninchen durch einen nachgiebigen FKV nachgebildet. Zum Einsatz kamen PET Fasern, welche getränkt mit einer Hydrogel Polymer Matrix auf dünne Schläuche gewickelt wurden. So entstanden dehnbare Schläuche mit Durchmessern von 0,85 mm und 1,5 mm, die vom prinzipiellen Aufbau her den künstlichen Muskeln von Festo [Fes06] und Koschmieder [Kos00] entsprechen. Im Falle der Sehne wird statt einem Innendruck eine Zugkraft angelegt.

Bei Belastung verschränken sich die nicht in Belastungsrichtung verlaufenden Fasern gegeneinander und ergeben so eine nicht lineare analytisch berechenbare Längenänderung. Die Autoren untersuchten die Abhängigkeit der Werkstoffeigenschaften vom Wickelwinkel der Faser und der verwendeten Matrix. Dabei kam es zu einer guten Übereinstimmung von berechneten, experimentell ermittelten und natürlichen Spannungs-Dehnungs-Kurven. In weiteren Untersuchungen soll das Langzeitverhalten, welches für den in-vivo Einsatz mitbestimmend ist, betrachtet werden.

2.3 Faserwelligkeit in technischen Strukturen

Die Grundfeste der Konstruktion mit FKV liegt in der Annahme, dass die in Belastungsrichtung liegende Faser fast die komplette Last trägt und die Matrix die Fasern schützt und bei Drucklasten stützt. In der Theorie ist diese Annahme durch die Definition einer P-ES (Parallelen Einzelschicht) umgesetzt, wobei die Äquivalente in der Praxis das UD-Prepreg-Tape und das UD-Gelege sind. Auch der abgelegte endlose Roving wird als geradlinig angesehen. Diese Geradlinigkeit existiert nicht immer, wie in Abbildung 14 schematisch gezeigt.

Im Allgemeinen unterscheidet man folgende von *Cox et al.* in [CoF97] beschriebene Fehlstellungen, welche sowohl im Gewebe als auch in Gelegen und UD-Tapes auftreten können.

1. Faserabstände (nicht relevant in der praktischen Anwendung)
 - Überlappungen oder Auseinanderrücken von benachbarten Fasern entstehen beim Legen des ebenen Halbzeuges in eine mehrfach gekrümmte Form.
2. Faserwelligkeit
 - Wellen entstehen oft durch das Pressen des ebenen Halbzeuges auf die wellenförmige Oberfläche der vorhergehenden Laminatlage. Außerdem können unterschiedliche Faserabstände die folgenden Lagen unregelmäßig wellig verformen.
3. Fadenquerschnitte (nicht relevant in der praktischen Anwendung)
 - Eigentlich gleichförmige Fäden in Geweben und Gelegen haben über die Länge keinen konstanten Querschnitt. Somit sind die Abstände und Dicken der Halbzeuge nicht konstant und ergeben Unregelmäßigkeiten im Laminat.

Ein Beispiel, bei dem durch das Verpressen der Lagen Welligkeiten (Imperfektionen) entstanden, ist in Abbildung 2 zu sehen. Selbst beim hochwertigen Wickelverfahren entstehen durch die schichtweise Ablage der Rovings Wellen, welche an der Oberfläche zu erkennen sind, siehe rechts in Abbildung 8. Diese 3D Imperfektionen sind rechnerisch nicht fassbar und entstehen fast immer durch falsche Formkonstruktionen oder Fertigungsfehler. Sie können somit nur durch ein effizientes Qualitätsmanagement vermindert oder ganz vermieden werden, [Mos92]. Neben diesen ungewollten Welligkeiten gibt es Faserimperfektionen, welche bedingt durch die Wahl des Halbzeuges entstehen. Augenscheinlichstes Beispiel ist die G-ES (Gewebe Einzelschicht), siehe Abbildung 1. Deren 3D Faserauslenkung ist bekannt und wird in der Konstruktion berücksichtigt. Die mechanischen Eigenschaften einer G-ES sind ungünstiger als die einer P-ES und durch empirische Versuche bekannt, bzw. sind berechenbar. Im Allgemeinen wird angenommen, dass

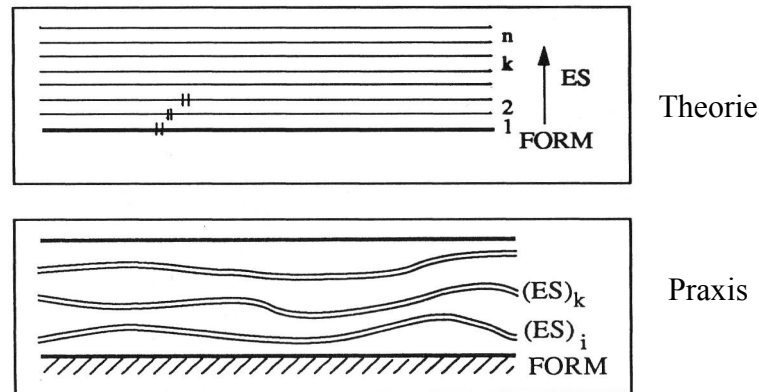


Abbildung 14: Schematische Theorie und Praxis der Faserorientierung, [Mos92]

sich Fasern relativ gleichmäßig und geordnet wellen. Dies geschieht durch die Regelmäßigkeit der Ablage (Wickeln, Pressen), durch die Regelmäßigkeit des Halbzeuges (Gewebe, $0^\circ/90^\circ$ Gelege) und/oder durch die Gleichmäßigkeit der Belastungen (Beulen, Stauchen, Aushärteschwindung). Die modellhafte Nachbildung ist ein sinusförmiger Verlauf der Fasern in der Matrix, wie er von [KTC88], [KoA03], [AKU04], [Swi75] und [Pas05] beschrieben wird.

Die Welligkeit von Fasern kann im ungeordneten Zustand undefiniert im dreidimensionalen Raum (x, y, z) vorliegen, obwohl durch die Faserausrichtung in Richtung der Belastung (x) nur Auslenkungen in die Richtungen (y) und (z) erlauben, siehe Abbildung 15. Bei einer definierten Faserwelligkeit sollen die Fasern gleichförmig und regelmäßig ausgelenkt sein. Unterteilt werden gewollte Faserwelligkeiten in 2D und 3D Welligkeit. Der entsprechende prinzipielle Unterschied ist in Abbildung 15 zu sehen. Die Faserausrichtung und Periodenrichtung ist jeweils in Belastungsrichtung, wobei bei der 2D Welligkeit die Richtung der Amplitude in der Laminebene (x, y) liegt (Welligkeitsebene = Laminebene) und bei der 3D Welligkeit die Amplitude senkrecht zur Laminebene steht und die Welligkeitsebene somit (x, z) ist.

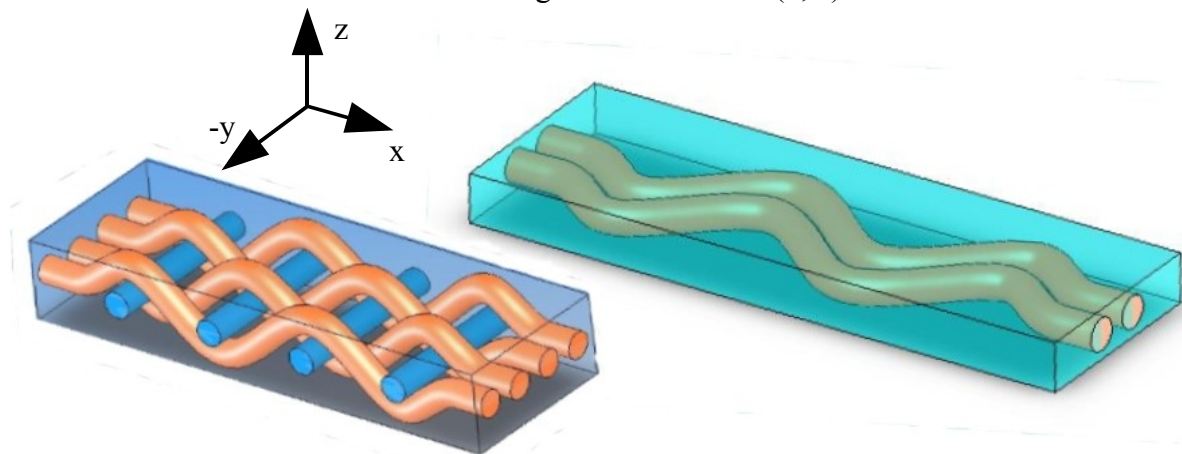


Abbildung 15: 3D Welligkeit und 2D Welligkeit

In [BrS05b] wird die Sinusfunktion durch einen Polygonzug approximiert. Dabei wird die Krümmung vernachlässigt und damit die Faserlänge mit Hilfe des Satzes von Pythagoras berechnet. Die Faserlänge s ergibt sich in Abhängigkeit von der Amplitude a für eine Periode λ aus

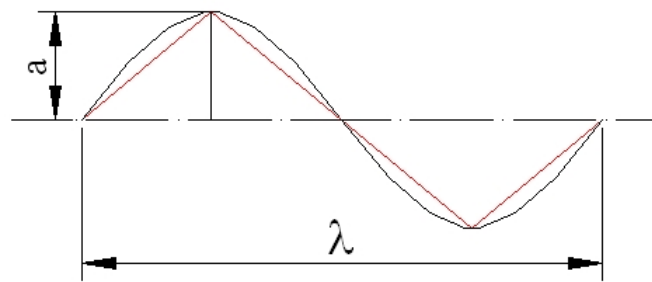


Abbildung 16: Approximation der Sinusfunktion durch einen Polygonzug

$$s = 4 \cdot \sqrt{a^2 + \left(\frac{\lambda}{4}\right)^2} \quad (2.6)$$

Die in Abbildung 16 gezeigten Verhältnisse verdeutlichen den Fehler in der Berechnung. Dem gegenüber lautet die genaue Beschreibung der Sinusfunktion

$$f(x) = a \cdot \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \quad (2.7)$$

Paschen [Pas05] kommt über die Bogenlänge

$$s = \int_0^x \sqrt{1 + [f'(x)]^2} dx \quad (2.8)$$

und der Sinusfunktion aus Gleichung (2.6) zu der wahren Länge s der sinusförmig gewellten Faser als

$$s = \int_0^x \sqrt{1 + \left[a^2 \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \cdot \cos^2\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)\right]} dx \quad (2.9)$$

Die Formel (2.8) ermöglicht, die Streckung der Faser quantitativ in Abhängigkeit von Amplitude und Wellenlänge zu erfassen. Die Dehnung ergibt sich damit als

$$\epsilon = \frac{\Delta s}{s} \quad (2.10)$$

mit L als Ausgangslänge der Probe im unbelasteten Zustand und

$$\Delta s = s - L \quad (2.11)$$

Mit diesen einfachen Zusammenhängen kann die Kompositsteifigkeit, aber nicht die Steifigkeit in jedem Punkt der gewellten Verstärkung bestimmt werden.

Kuo *et al.* [KTC88] dagegen gehen von der Laminattheorie (CLT) aus und bilden die Faserwelligkeit eines Volumenelementes von x bis $x + dx$ durch die Angabe des Winkels (θ) am Anstieg der Faser und der x -Achse ab, vergl. Abbildung 17. Das Volumenelement wird somit als ein differentiell kleines Laminat mit einer entsprechenden Orientierung betrachtet, wobei Formel 2.12 als Grundlage dient.

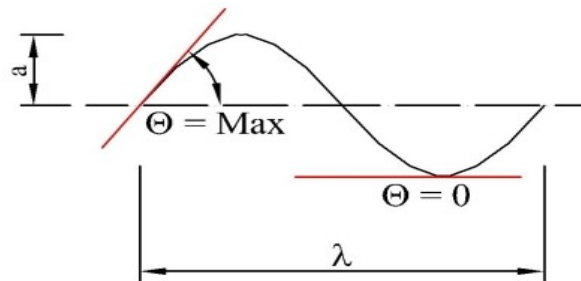


Abbildung 17: Winkel Θ zwischen Tangente und X -Achse

Der Winkel Θ geht in die Steifigkeitskoeffizienten der CLT ein und es können die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen für jeden Punkt der Faser numerisch bestimmt werden. Desweiteren unterscheiden die Autoren zwischen einem phasengleichen (Iso-Phase) und einem phasenversetzten (out-off-phase) Modell, siehe Abbildung 18.

$$\tan \Theta = \frac{dy}{dx} = \frac{2\pi a}{\lambda} \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \quad (2.12)$$

Zu beiden Modellen wurden Experimente durchgeführt, indem Kohlenstofffasern wellig in eine Silikonmatrix eingebettet wurden. Die Ergebnisse der Zugversuche und der numerischen Berechnungen stimmen gut überein, wobei nur jeweils zwei Proben gefertigt und getestet wurden. Die gleiche Einschränkung gilt für die durchgeführten spannungsoptischen Versuche, was vor allem an der aufwendigen Fertigungsmethode lag. Die Autoren fertigten einzelne wellige Rovings und

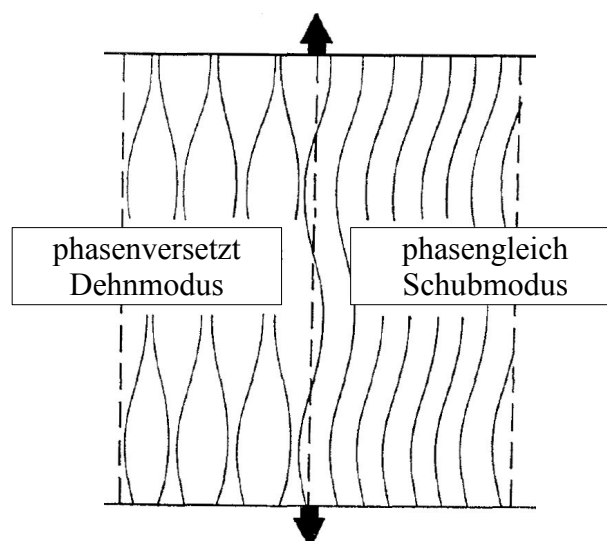


Abbildung 18: Phasenlage benachbarter Fasern, nach [Swi75]
betteten diese zwischen vorgefertigten Silikonplatten ein.

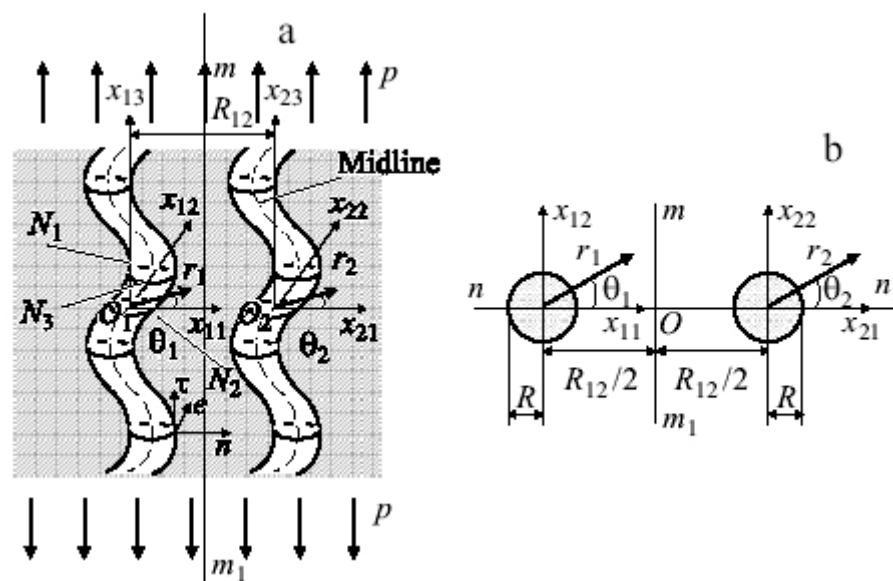


Abbildung 19: Geometrie und Koordinatensysteme, nach Akbarov [KoA03]

Die Forschungsgruppe um Akbarov und Kosker [KoA03], [AKU04] hat in ihren Arbeiten die Wechselwirkung benachbarter welliger Faser in einem Komposite untersucht. Es werden, ausgehend von den dreidimensionalen Gleichungen der Elastizitätstheorie für anisotrope Materialien, die numerischen Ansätze gezeigt, welche die ausgeglichenen Normal- und Schubspannungen in der Faser-Matrix-Interaktion bei welligen Faserlagen berechnen.

Dabei liegen die Mittellinie aller Fasern in einer Ebene (2D Welligkeit), die Welligkeit ist periodisch und die Fasern liegen phasengleich, siehe Abbildung 19. Die Ergebnisse der numerischen Rechnungen zeigen, dass die Schubspannungen in der Kontaktfläche Faser-Matrix bei Annäherung zweier Fasern größer und die Normalspannungen kleiner werden. Gleichzeitig sind sowohl die Schub- als auch die Normalspannungen in FKV mit Verstärkungen aus welligen Fasern größer als bei gradlinigen benachbarten Fasern.

Wielage et al. [WKL02] stellen eine Finite Elemente Analyse (FEA) einer G-ES vor und beginnen mit der Definition einer immer wiederkehrenden Zelle im Gewebe. Die verschlungenen Faserbündel, welche eine sich wiederholende Faserwelligkeit darstellen, können bedingt durch die Art der Gewebebindung (Leinwand, Atlas, Köper) unterschiedlicher Anzahl und Geometrie sein. Das Modell besteht aus zwei Sektionen (reine Matrix und Gewebe mit Matrix getränkt), welche miteinander interagieren. Des Weiteren können in der Matrix Poren und Fehlstellen eingebracht werden. Die Stoffeigenschaften der Verbundsektion (getränktes Gewebe) werden mithilfe analytischer Methoden berechnet. Der Vergleich der berechneten E-Moduln, Schubmoduln und thermischen Ausdehnungen zeigt eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen (einachsige Zugversuche) Werten, was einer Anwendbarkeit des FE-Modells für Werkstoffe aus GfK gleichkommt. Das vorgestellte FE-Modell ermöglicht es also den Einfluss von Faserwelligkeiten auf die Werkstoffeigenschaften zu berechnen.

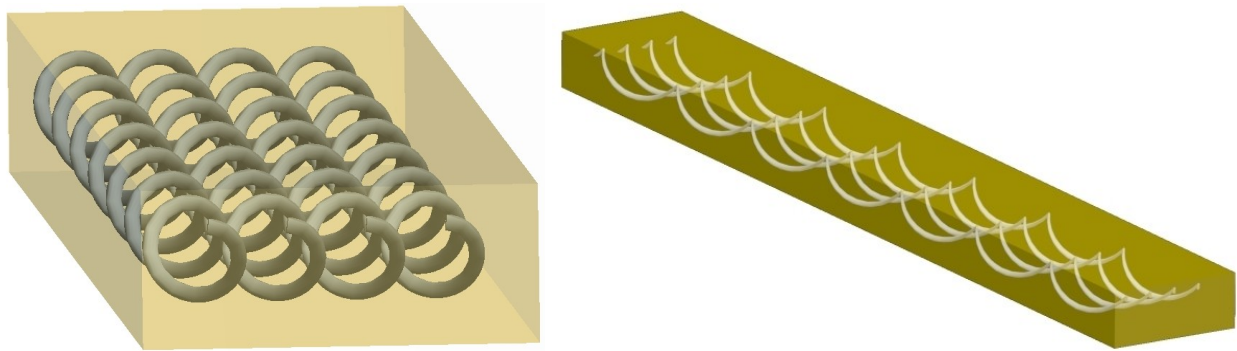


Abbildung 20: Schematischer helixförmiger Faserverlauf

Eine Art Mischung aus 2D und 3D Welligkeit ist der helixförmige, geflochtene oder gedrehte Verlauf von Fasern. Abbildung 20 zeigt diesen mathematisch definierten schraubenartigen dreidimensionalen Verlauf. Neben der schwierigen Fertigung ist der geringe Faservolumenanteil in geschichteten flächigen Laminaten der Hauptnachteil dieser Faserausrichtung. Gedreht angeordnete Fasern in einer nachgiebigen Matrix haben das Potential zu geometrischen Dehnungen (ausgangslängenbezogene Verformung der Probe bis zum lastparallelen Ausrichten der welligen Faserkomponente). Die Größe der möglichen Dehnungen hängt von der Steigung der schraubenförmigen Anordnung der Fasern ab, wobei die lang gestreckte Faserhelix rechts in Abbildung 20 steifer als die links dargestellte Verdrillung mit kleiner Steigung ist.

Iannace *et al.* stellen in [ISA95] eine künstliche runde Sehne aus faserverstärktem Kunststoff vor. Die helixförmig gewickelten Fasern ändern ihren Winkel bei Belastung und erlauben Dehnungen bis 60%, wobei diese vom Ausgangswinkel abhängen. Die mathematischen Zusammenhänge wurden unter anderem von Koschmieder [Kos00] beschrieben. Flächige dehnbare Strukturen sind mit dieser Wickelmethode nicht möglich.

2.3.1 2D Umlenkung von Faserverstärkungen

Die 2D (zweidimensionale) Umlenkung von Verstärkungsfasern lässt diese in der Laminebene (x, y) undulieren und bietet somit den Vorteil der Laminierbarkeit des flächigen Halbzeuges, siehe Abbildung 21. Die flächigen Halbzeuge können schichtweise in z -Richtung aufgebaut werden und dabei entsprechend der gewünschten Werkstoffeigenschaften auch in Winkeln zur x -Rich-

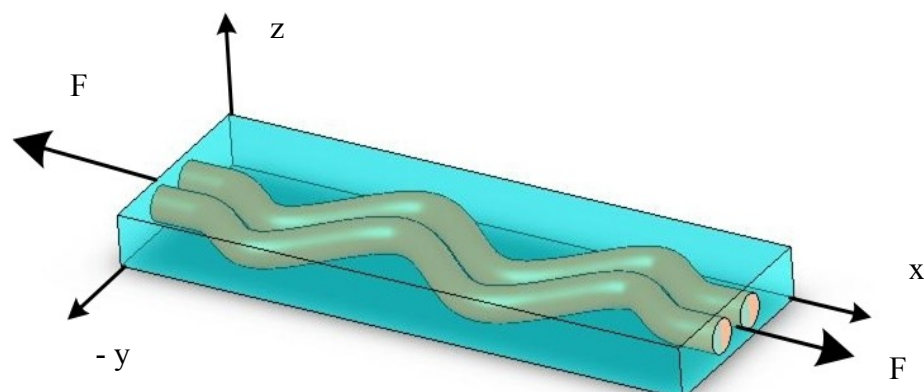


Abbildung 21: Sinusförmige 2D Welligkeit mit Belastungen und KS, nach [Pas05]

tung ausgerichtet werden. Die gewellten Fasern werden beim anschließenden Pressen und Härten des Laminates nicht zurück verformt und es können die von klassischen Laminaten bekannten Faservolumenanteile erreicht werden. Außerdem ist die Faserwelligkeit von vornherein im trockenen oder getränkten Faserhalbzeug enthalten und entsteht nicht während des Herstellungsprozesses. Dadurch sind eine höhere Qualität und Konstanz der Werkstoffeigenschaften möglich. Faserwelligkeit in der Laminebene tritt im Allgemeinen nicht gewollt auf. Eine 2D Auslenkung der Fasern entsteht aber bei einigen Verfahren der Halbzeugherstellung. Beispiele für diese mikroskopischen Faserumlenkungen sind das Z-Pining und das Vernähen.

Beim Z-Pining werden Prepreg Lamine durch das Einbringen von vielen dünnen Stiften senkrecht zur Laminebene verstärkt. Diese Verstärkung soll die Verbindung der einzelnen Laminatschichten verbessern, die Impaktfestigkeit erhöhen (senkrecht zur Laminebene) und nach einer Schädigung die Rissausbreitung verhindern. Durch das Einbringen der ca. 0,3 mm dicken Metall- oder CFK Stifte (Pins) werden die gestreckten UD-Lagen ausgelenkt und aufgrund des Pin-Musters ergibt sich ein sinusförmiger Faserverlauf. Der Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften wurde am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik / Leichtbau im Rahmen des EMIR-Projektes untersucht, wobei die Ergebnisse nicht nur positiv sind. Hierbei spielen sowohl die Störung des Geleges als auch der Fertigungsaufwand eine Rolle. Der Grad der Verpinnung eines Bauteils wird in Flächenprozent angegeben. Hier können zwischen 2% und 7,5% der Gesamtfläche Pins sein. In

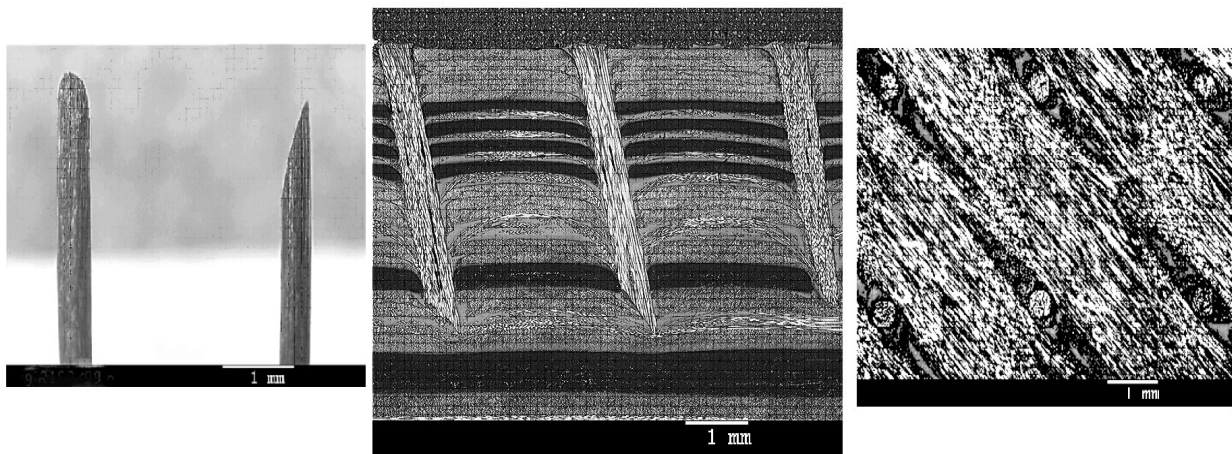


Abbildung 22: Z-Pins, im Längs- und Querschnitt [ScE04]

Bezug auf die Faserwelligkeit sind die Auslenkungen ($a = 0,15 \text{ mm}$) sehr klein, aber die Periode beträgt auch nur 7 mm. Damit haben verpinte UD-Lagen ein Welligkeitsverhältnis von 0,021 und die möglichen Dehnungen durch Faserwelligkeit sind vernachlässigbar. Außerdem kommen beim Z-Pining, im Gegensatz zur gewollten 2D Welligkeit, steife Matrices zum Einsatz und auch die Pins selber verhindern ein Strecken der welligen UD-Lagen. An Abbildung 22 sind links nicht verarbeitete CfK-Pins und jeweils ein Längsschnitt und ein Querschnitt von verpinnenden UD-CFK Platten zu sehen. Deutlich sind die Anschrägung der Spitze zu erkennen und die daraus resultierende Neigung der Pins im Laminat. Die Verdrängung der Fasern mit der entstandenen Welligkeit und freien Harzräumen ist ganz rechts zu sehen.



Abbildung 23: Genähter Vorformling des IPF [Gri06]

Ein ähnliches Faserverformungs- und Laminatschädigungsbild entsteht beim Vernähen von Halbzeugen und Vorformlingen. Ein solcher Vorformling ist in Abbildung 23 zu sehen, wobei deutlich die weißen Nähfäden zwischen den Kohlenstofffasern zu erkennen sind. Vorformlinge ermöglichen eine genaue Positionierung der Fasern in einer Form und fixieren diese während des Tränkvorgangs im RTM Verfahren.

Nachteilig ist die Auslenkung der in Belastungsrichtung liegenden Fasern durch die senkrecht dazu verlaufenden Nähfäden. Zwar ist diese Welligkeit durch ein sehr kleines a/λ gekennzeichnet, aber die prinzipiellen Merkmale der fiber waviness sind zu erkennen.

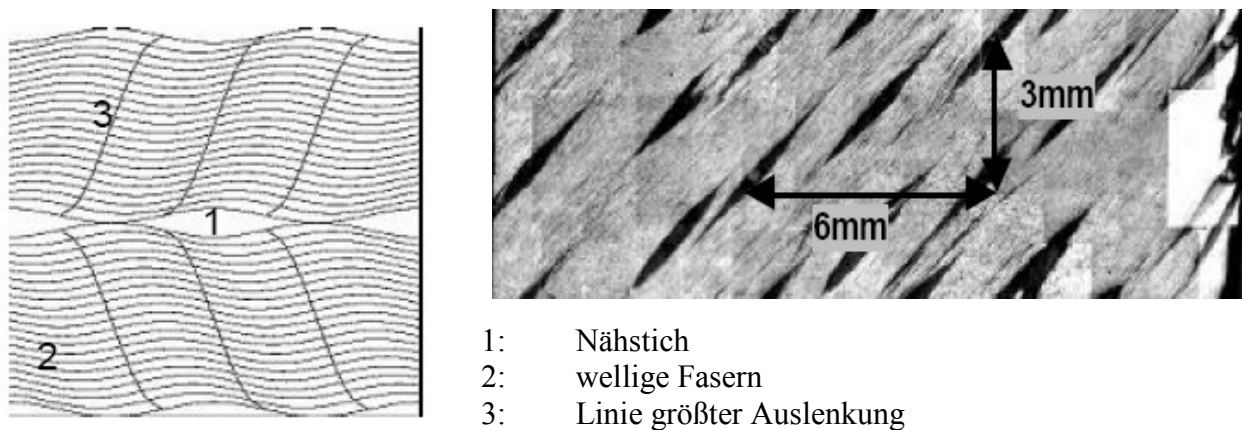


Abbildung 24: Faser Verformungen durch Nähen , Schema und Schnittbild, [SHe01]

In Abbildung 24 sind die Schnittbilder vernähter Faserverstärkungen dargestellt und die 2D Welligkeit mit den Nähstichfreiräumen ist gut zu sehen. Durch den Nähfaden werden die ursprünglich gestreckten Fasern bei jedem Durchstich ausgelenkt und es entstehen langezogene Freiräume zwischen den Fasern. Neben der Faserauslenkung werden die zu vernähenden Fasern durch das Stechen geschädigt und teilweise mitgerissen. Außerdem verhindern die eingebrachten Nähfäden, im Hinblick auf N-FKV, das Strecken der welligen Fasern und stellen eine Verbindung der einzelnen Laminatschichten dar.

2.3.2 3D Umlenkung von Faserverstärkungen

Die 3D (dreidimensionale) Umlenkung von Verstärkungsfasern lässt sie senkrecht zur Laminatenebene (x, y) ondulieren, siehe Abbildung 25. Damit wird der Vorteil der Laminierbarkeit eines flächigen Halbzeuges aufgegeben, denn die Auslenkung entsteht erst beim Laminieren und Verpressen der Lagen. Dabei beeinflusst das Pressen die Welligkeit negativ und es besteht die Ge-

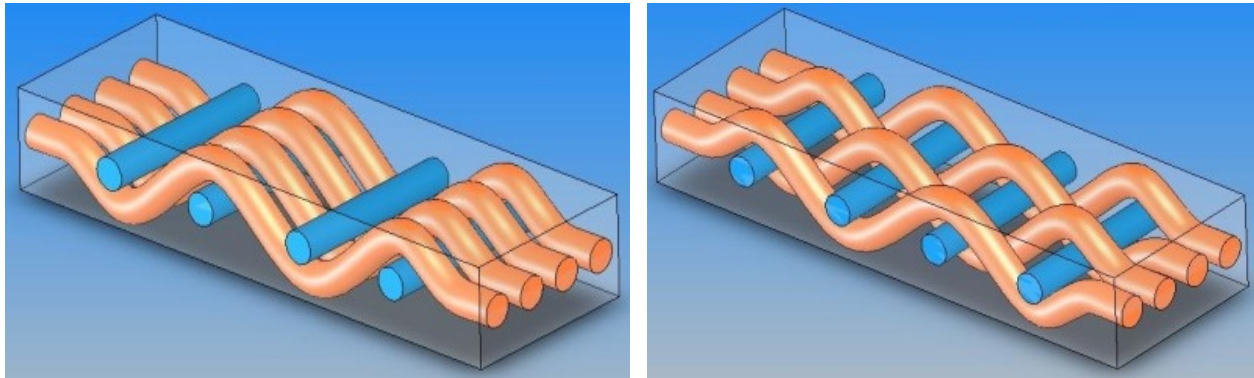


Abbildung 25: Schematische 3D Welligkeit, P-ES und G-ES

fahr des Zurückverformens, da die Presskraft in Richtung der Amplitude wirkt (z – Richtung). Es muss davon ausgegangen werden, dass die Prozessqualität und die Konstanz der Werkstoffeigenschaften nicht denen der 2D Welligkeit entspricht. Diese These wird durch die Fertigungsversuche von Murry in [Mur99] und durch eigene Versuche bestätigt.

Die in Abbildung 26 als weiße Linien erkennbaren Laminatschichten sind zwar gewellt, aber weder in Längs- noch in Dickenrichtung gleichmäßig. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche zur Herstellung 3D gewellter Proben aus P-ES kamen zu keinen nutzbaren Ergebnissen, da die erreichten Amplituden kleiner als 0,166 mm (halbe Rovingdicke) waren und durch das Verpressen die nötige genaue Positionierung nicht möglich war.



Abbildung 26: CFK Balken mit ungleichmäßiger 3D Welligkeit, Negativaufnahme [Mur99]

Chun *et al.* beschreiben in [ChS99] Berechnungen und Experimente mit 4-Punkt Biegeversuchen. Dazu wurden 3D gewellte Lamine hergestellt, indem Prepregs in gefrästen Formen gepresst und ausgehärtet wurden. Diese dicken welligen Lamine wurden nach der Aushärtung zu geraden Proben geschnitten. Dabei wurden nur kleine Welligkeitsverhältnisse a/λ von 0.011 bis 0.059 erreicht. Mit größer werdendem Welligkeitsverhältnis wichen die Ergebnisse der Biegeversuche und der Berechnungen stärker von einander ab.

Hsiao *et al.* stellen in [HWD94] erfolgreiche Fertigungsexperimente zur Herstellung von definierter Faserwelligkeit mittels des Pressverfahrens vor. Hierbei werden UD und Gewebeprepgs abgelegt und mit mehr oder weniger senkrecht zur Belastungsrichtung verlaufenden Drähten oder Rovings vor dem Härten ausgelenkt. Als Ergebnis werden Lamine mit innenliegenden welligen Schichten gezeigt, welche aber ein sehr kleines Welligkeitsverhältnisse a/λ haben. Die Autoren haben vor allem das Ziel des besseren Verständnisses von Faserknicken bei Druckbelastung. Das Verfahren wurde getestet und als nicht für die Produktion von welligen Halbzeugen geeignet bewertet. Die Verwendbarkeit von nachgiebigen Polymermatrices wurde nicht untersucht.

Ein ähnliches Verfahren zeigen Kuo *et al.* in [KTC88]. Die Autoren nutzen eine Aluminiumform, um die getränkten Fasern in die gewünschte Sinusform zu bringen. Hierbei wird ein Wel-

ligkeitsverhältniss a/λ von 0.09 erreicht. Neben den gezielt hergestellten 3D Welligkeiten durch Pressen gibt es die halbzeugbedingte 3D Welligkeit eines Gewebes (G-ES). Je nach Bindungsart verschlingen sich Schuss- und Kettfäden mehr oder weniger miteinander, [CoF97]. Im unbelasteten Zustand sind beide senkrecht zueinander verlaufende Fäden wellig. Bei einachsiger Belastung in Kettfadenrichtung streckt sich eine Richtung (Kettfäden) und die quer verlaufenden Schussfäden werden stärker ausgelenkt. Damit stellt die senkrecht zur Lastrichtung verlaufende Faser eine Behinderung der sich streckenden belasteten Faser dar. Dazu kommt der hemmende Einfluss der Matrix, wobei dieser bei steifen Matrices (EP und UP) so groß ist, dass die Faserstreckung nur einhergeht mit Matrixbrüchen. Dies wurde bei Zugversuchen mit grobem Leinwandgewebe und UP-Harzen beobachtet. An jeder Verschlingung traten Matrixquerbrüche auf, da hier die Dehnungen am gravierendsten sind. Im Gegensatz dazu wurde in Zugversuchen mit Leinwandgewebe und einer PUR-Matrix beobachtet, wie sich die Kettfäden streckten, die Matrix sich verformte und die Schußfäden sich stärker wellten.

Jacobson et al. vergleichen in [JLD04] mit der klassischen Laminat Theorie (CLT) berechnete Gewebeeigenschaften mit experimentell in Zugversuchen bestimmten Ergebnissen. Hierbei schlugen sich die kleinen Amplituden der Welligkeit der G-ES im Vergleich zu der nicht geradlinigen Ausrichtungen der Fasern in Belastungsrichtung kaum nieder. Daher war auch der Einfluss des Laminataufbaus (Anteil der in Belastungsrichtung gewellten Fasern) gering.

Mit der Entwicklung leistungsfähiger Rechnersysteme wurden in den letzten Jahren vermehrt Finite-Element-Analysen an welligen Fasern und Geweben in FKV durchgeführt.

Eine Möglichkeit der Berechnung von 3D gewellten Strukturen wird von *Müller* und *Wielage* in [MLW06] und [WKL02] anhand der Modellierung und Berechnung von gewebeverstärkten Verbundwerkstoffen mittels der FEM-Software Abaqus vorgestellt. In dem entwickelten Modell wurde die gewebte Rovingstruktur mit den Sektionen des reinen Harzes, den getränkten Rovingbereichen und mit Poren nachgebildet. Diesen Bereichen wurden unterschiedliche Werkstoffeigenschaften zugewiesen. Die Ergebnisse der Berechnungen wurden mit Experimenten validiert und es ist eine gute Übereinstimmung der Resultate festgestellt worden. Durch die genaue Diskretisierung des stofflichen Aufbaus des gewebeverstärkten FKV konnte ein FEM-Modell entwickelt werden, welches die analytisch schwer fassbaren Werkstoffeigenschaften der 3D gewellten Fasern in einer G-ES gut abbildet.

2.3.3 Ein rheologisches Modell für N-FKV

Zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens von Polymeren werden rheologische Modelle erstellt, welche die mechanischen Eigenschaften abbilden. Die Rheologie ist die Wissenschaft von der Deformation und dem Fließen der Stoffe, [Men90]. Zu den zentralen Aufgaben der Rheologie gehört das Messen, Beschreiben und Erklären des Stoffverhaltens der Materie unter der Einwirkung von äußeren Kräften und Verformungen. Zur mathematischen Erfassung des Verhaltens eines beliebigen Stoffes werden aus den Grundlagen der Mechanik idealisierte Körper zu Hilfe genommen. Mit definierten Anordnungen dieser Körper zueinander ist es möglich, die physikali-

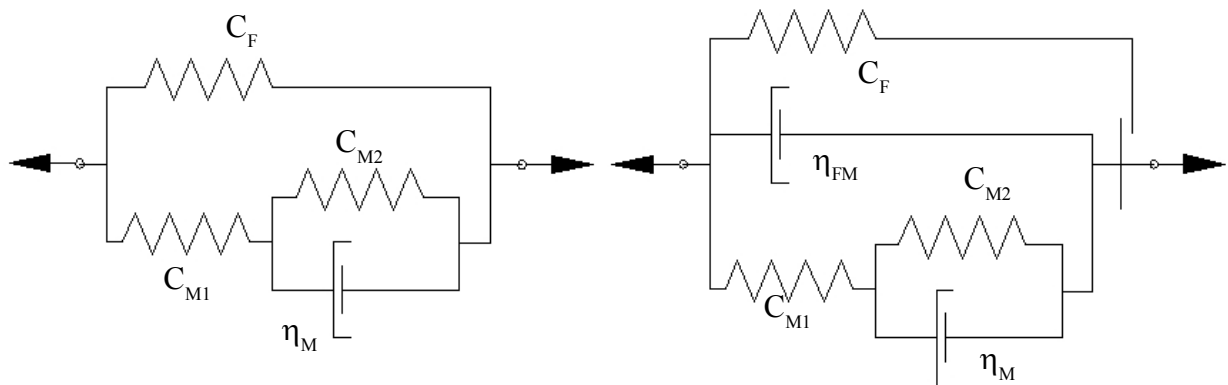


Abbildung 27: Rheologische Modelle, li. FKV und re. N-FKV, nach Paschen [Pas05]

schen Eigenschaften verschiedenster Materialien modellhaft darzustellen [PLG95]. Im Falle eines N-FKV bedürfen besonders die eingebrachten nicht geraden Verstärkungskomponenten und deren Orientierung und Interaktion mit der nachgiebigen Matrix einer genauen theoretischen Beschreibung. Ein unidirektional verstärkter FKV lässt sich, wie links in Abbildung 27 gezeigt, darstellen. Hierbei sind die Matrix und die Faser in einer Parallelschaltung zu sehen, was einer unidirektional in einer Matrix eingebetteten Faser entspricht, vergleiche Abbildung 28. Die Faser gilt als linearer Hook'scher Körper, Federsteifigkeit C_F , wogegen die Matrix sich aus einem Kel-

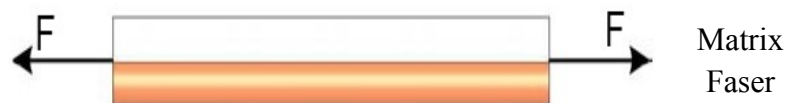


Abbildung 28: UD-Verbund mit parallel geschalteter Faser und Matrix, [Pas05]

vin-Voigt- (C_{M2} parallel zu η_M) und einem Hook'schen Körper (C_{M1}) zusammensetzt.

Rechts in Abbildung 27 ist ein mögliches Modell für einen N-FKV abgebildet. Ein Anschlag bildet das Erreichen der vollen Faserstreckung ab und trennt die beiden Federbereiche der J-Kurve in Abbildung 3. Außerdem wurde ein weiterer Dämpfer η_{FM} benutzt, um das Strecken der Fasern in der dabei verdrängten Matrix abzubilden. Kriechen und Spannungsrelaxion bei gestreckter Faser werden in diesen Modellen nicht beachtet, da von kurzen Belastungen ausgegangen wird.

Das rheologische Verhalten von Sehnengewebe wird durch den nicht linearen Spannungs-Dehnungs-Verlauf, die Spannungsrelaxion und das Kriechverhalten bestimmt. In [OSc88] wird das in Abbildung 29 gezeigte rheologische Modell genutzt, um Sehnengewebe abzubilden.

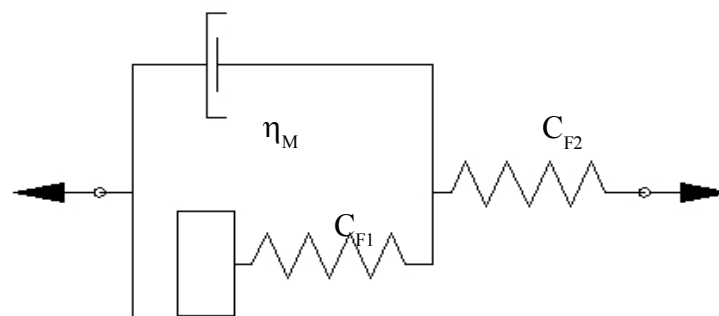


Abbildung 29: Rheologisches Modell für Sehnengewebe, nach Otte et al. [OSc88]

In diesem Modell wird das viskoelastische Verhalten durch das Parallelschalten eines Dämpfers (Elastin Matrix, η_M) mit einer Feder (Kollagen Fibrillen, C_F) abgebildet. Dabei ist die Feder in Reihe mit einem Reibungselement geschaltet. Dieses Reibungselement stellt eine irreversible plastische Deformation dar, welche Alterung und Relaxion modellieren. Zusammen mit der zweiten Feder C_{F2} wird das nicht lineare Sehnenverhalten durch eine geknickte Federkennlinie angenähert abgebildet. Die rheologischen Modelle wurden nicht experimentell bestätigt, stellen aber die theoretischen Prinzipien anschaulich dar.

2.3.4 Vergleich und Bewertung von Herstellungsverfahren für N-FKV

Ausgehend von bekannten Herstellungsverfahren für FKV wurden verschiedene Herstellungsverfahren für N-FKV entwickelt und in der Praxis getestet. Beim klassischen Laminieren werden zweidimensionale Lagen getränkt, auf einer Form geordnet abgelegt, gepresst und ausgehärtet. Diese zweidimensionalen Lagen zeichnen sich durch eine gute Handhabbarkeit, eine gute Tränkbarkeit, eine gute Laminierbarkeit und eine gute Formstabilität aus. Sie werden in bestimmten Breiten auf Rollen geliefert, sind lange lagerbar und können maschinell geschnitten und getränkt werden. In Bezug auf die mechanischen Eigenschaften sind UD-Gelege und auch Gewebe qualitativ hochwertig. Basierend auf diesen positiven Attributen sollten die N-FKV auf Standardflächenhalbzeugen aufbauen, [BrS06a].

Verdrängen

Eine gleichförmige 2D Welligkeit kann beim Einsatz von Z-Pins entstehen. Dieser Ansatz findet sich im Verdräng-Verfahren wieder. Hierbei werden flächige Faserhalbzeuge von systematisch angeordneten angespitzten zylindrischen Stiften durchstoßen. Bei dem Durchstoßen der Laminat-einzelschicht werden die Faserstränge verdrängt und es ergeben sich sinusförmige Strukturen. Dabei muss das Halbzeug auf einer weichen Unterlage liegen, oder es gibt eine steife Gegenstruktur, in die die Stifte passen. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass das Halbzeug im Ganzen verformt wird und somit eine Beeinflussung nacheinander ablaufender Verformungsschritte nicht möglich ist. Vor dem eigentlichen Durchstossvorgang müssen beim Gewebe zwei und beim Ge-

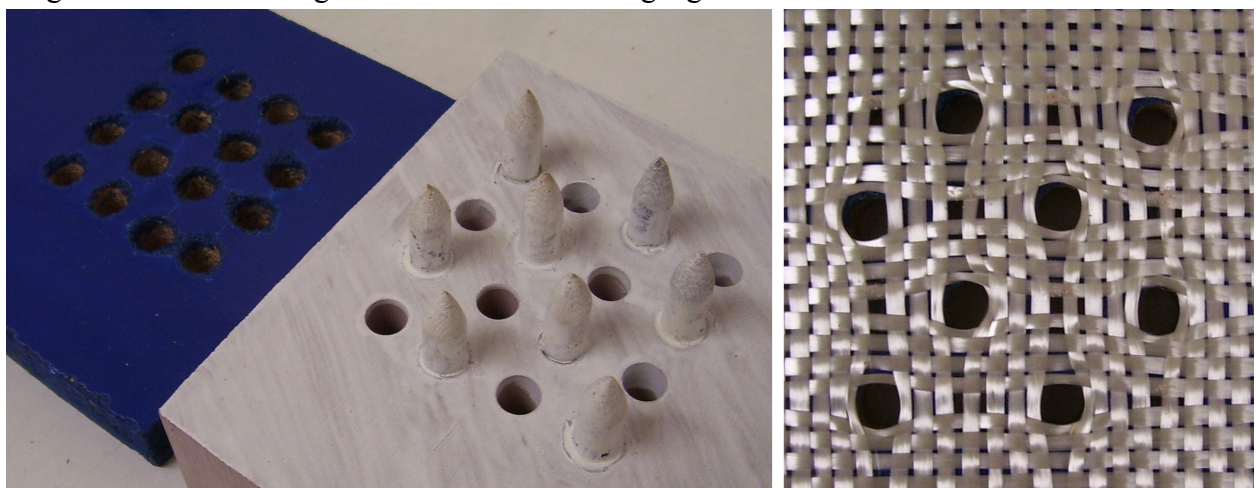


Abbildung 30: Verpin - Mechanismus mit verzerrtem Halbzeug

lege eine Seite fixiert werden. Die Verwendung von Geweben bietet die interessante Möglichkeit eine zweidimensionale weiche Einzelschicht herzustellen. Durch das Durchstoßen werden sowohl die Kett- als auch die Schussfäden ausgelenkt. Durch die Verschlingung der orthogonal zueinander verlaufenden Fäden ergibt sich eine recht stabile Verzerrung, die sich nach dem Entformen der Pins nicht zurück verformt. Der Hauptnachteil des Verdrängens ist die nötige genaue Anpassung des Mechanismus an das gewählte Halbzeug. Fadenbreite (im Gewebe) und Pinabstand müssen genau abgestimmt sein, um eine optimale Faserwelligkeit zu erreichen und Faserschäden zu vermeiden. Eine durchstoßene Einzelschicht enthält natürlich die Löcher der gezogenen Pins, welche sich beim Tränken mit Matrix füllen. Beim Laminieren ist es daher wichtig, die Einzelschichten versetzt zu einander zu platzieren, damit eine geschlossene Struktur entsteht.

Pressen

Als einfachstes Verfahren soll das Pressen genannt werden, obwohl hierbei 3D Welligkeit entsteht. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Potenzial des Verfahrens in Laminierversuchen mit

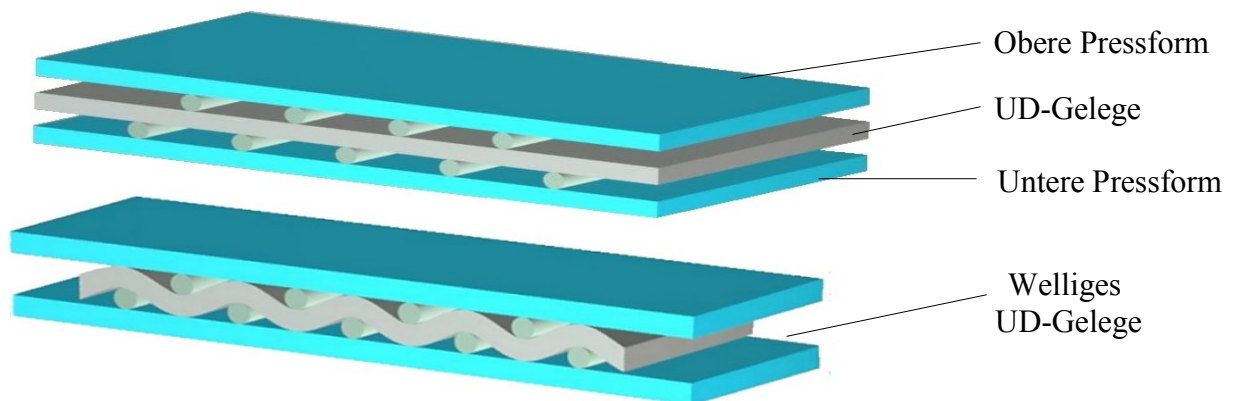


Abbildung 31: Schematischer Pressvorgang zur Erzeugung von 3D Welligkeit

UD-Gelegen untersucht und die Ergebnisse waren nicht überzeugend. Neben der schlechten Laminierbarkeit entstanden nur sehr kleine Amplituden (durch das Pressen der Laminatschichten) und damit nur ein geringes Dehnungspotential.

Schwenken und Verzerren

Das Schwenk-Verfahren zum Erzeugen von 2D Welligkeit im geradlinigen Flächenhalbzeug zeichnet sich durch das parallele Verschieben von Schiebearmen bei gleichbleibenden Abstand aus. Die Idee und der Prototyp wurden in Zusammenarbeit mit T. Reinboth erarbeitet und in [Rei05] beschrieben. Mit dem in Abbildung 32 schematisch dargestellten Mechanismus ist es durch das Verschieben von frei positionierbaren Schiebearmen möglich, das flächige Halbzeug an mehreren Stellen zu verzerren. Dabei greifen kleine Widerhaken in die Kettfasern und ziehen diese mit. Für reproduzierbare Ergebnisse laufen die Schiebearme parallel und die Widerhaken greifen gleichmäßig in die Faserstruktur. Bei ersten Versuchen wurden die Schiebearme gleichzeitig betätigt, was zu starken Bewegungen in der Matrix führte. Außerdem konnten sich die Fasern in Längsrichtung nicht verkürzen. Aus diesem Grund wurden in den weiteren Versuchen die

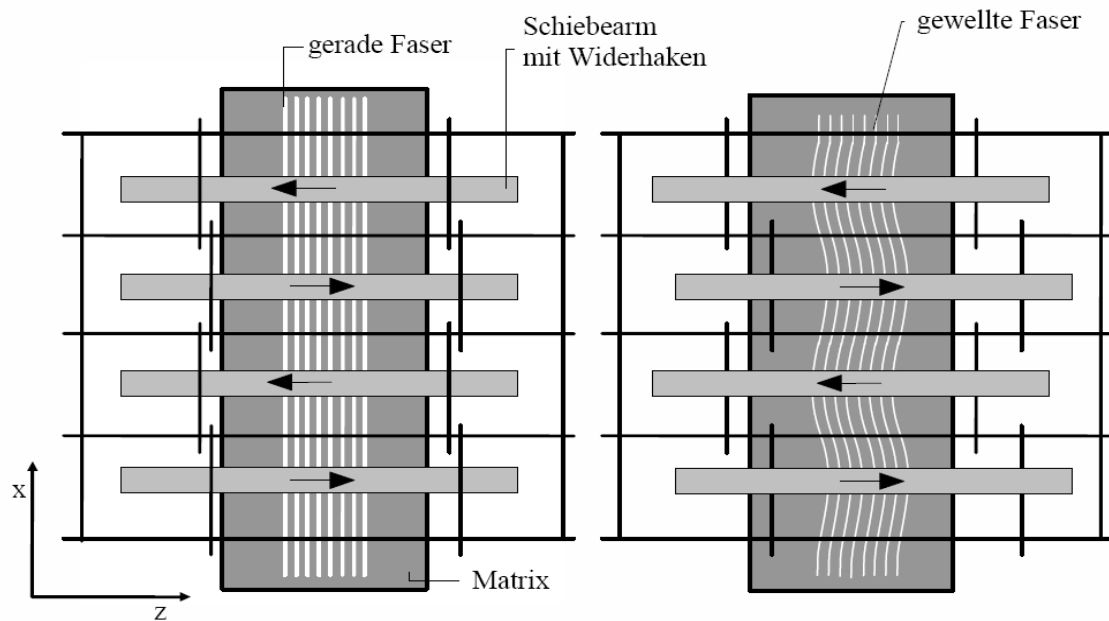


Abbildung 32: Mechanismus zum Verzerren von flächigen Faser-Halbzeugen

Schiebearme nacheinander bewegt und die noch geraden Fasern rutschen in X-Richtung nach. Dies führte beim Einsatz des in Abbildung 34 dargestellten Prototypen zu Fehlstellungen der Querfasern der verzerrten Gewebe.

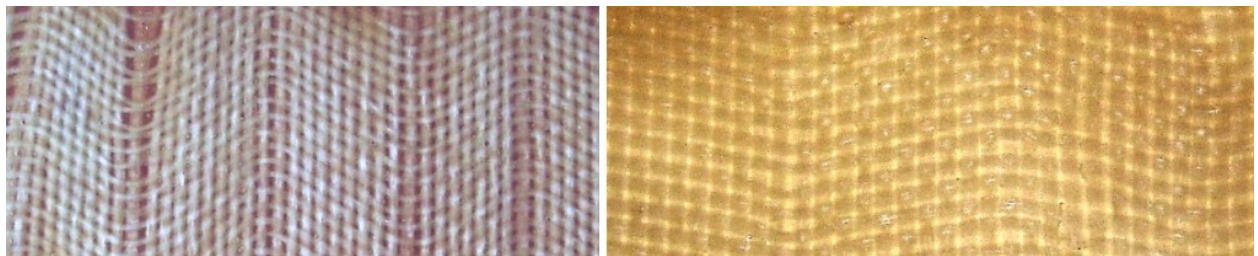


Abbildung 33: Li.: Fehlstellen nach Verzerren, Re.: keine Fehlstellen nach Schwenken

Dieses Zusammenschieben der Schussfäden (Querfasern) ließ vor allem in den Umlenkpunkten Matrixhäufungen entstehen, wie in Abbildung 33 im Vergleich zu einer geschwenkten Probe zu sehen.

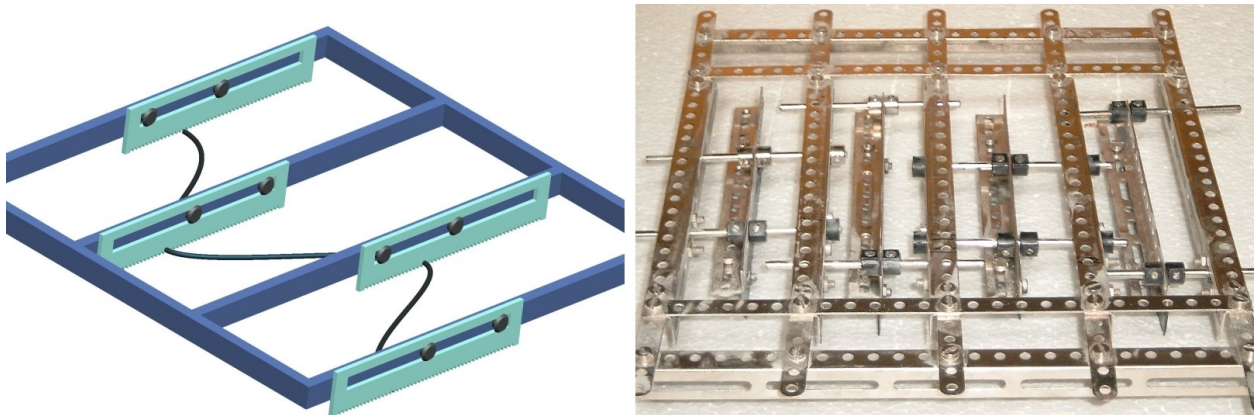


Abbildung 34: Virtueller und realer Fertigungsprototyp – Version 1

Um diese ungewollten Verschiebungen zu vermindern bzw. abzustellen wurde der Fertigungsprototyp verbessert, wobei die Schiebearme durch Schwenkarme ersetzt wurden. Somit wird gleichzeitig in Y-Richtung verzerrt und in X-Richtung verkürzt.

Die Version 2 des Fertigungsprototypen ist in Abbildung 35 zu sehen. Die mit diesem Gerät erzeugten Proben zeichnen sich durch einen homogenen Aufbau und weniger Fehlstellen aus. Trotz des gleichzeitigen Verzerrens kommt es zu Unregelmäßigkeiten in der Gewebelage. Ähnlich dem Drapieren verändert das seitliche Versetzen einzelner Lagenabschnitte die Winkel von Kettfäden zu den Schussfäden. Die ursprüngliche Orthogonalität gibt es nur noch an den Wendepunkten, während an allen anderen Stellen der Tangentenwinkel θ größer Null, aber kleiner Winkel θ_{Max} ist. Der Winkel θ_{Max} liegt an den Wendepunkten, auf der Hälfte zwischen zwei Wendepunkten. Die Zusammenhänge sind in Abbildung 17 dargestellt. Prinzipiell können mit dem hier vorgestellten Mechanismus alle gängigen flächigen Faserhalbzeuge verformt werden. Es wurden Experimente mit verschiedenen Gelegen, Geweben und Prepregs durchgeführt. Dabei ließen sich relativ grobe Gewebe am besten verarbeiten, da diese genug Spielraum zum Verdrehen von Kette und Schuss haben und gleichzeitig steif genug sind, um nicht zu beulen. Das Beulen senkrecht zur Laminebene trat sowohl bei feinen Geweben (163 g/m²) als auch bei feinen Gelegen (250 g/m²) auf. Das sehr steife UD-1000 Gelege (1000 g/m²) war kaum zu verformen und streckte sich nach dem Lösen des Mechanismus fast komplett zurück.

Die Verarbeitung von thermoplastischen Prepregs ist handwerklich eine Herausforderung. Der Verzerrmechanismus musste bei einer Probentemperatur von ca. 280°C eingesetzt werden. So wurde das thermoplastische Prepreg erst aufgeschmolzen, dann verformt und dann wieder abgekühlt. Die Probe musste konstant beheizt werden, damit die Matrix während der Umformung geschmolzen blieb. Es konnten einfache Proben mit 2D Welligkeit erzeugt werden, wobei auch hier beobachtet wurde, dass die Fasern bestrebt sind, sich zurück zu strecken. Hier ist das Erstarren der Matrix durch Abkühlung eine willkommene Eigenschaft, da die Welligkeit dadurch direkt fixiert wird. Für weiterführende Untersuchungen ist die Entwicklung einer geschlossenen beheizbaren Verformungsapparatur notwendig, da durch die hohen Temperaturen die Verletzungsge-

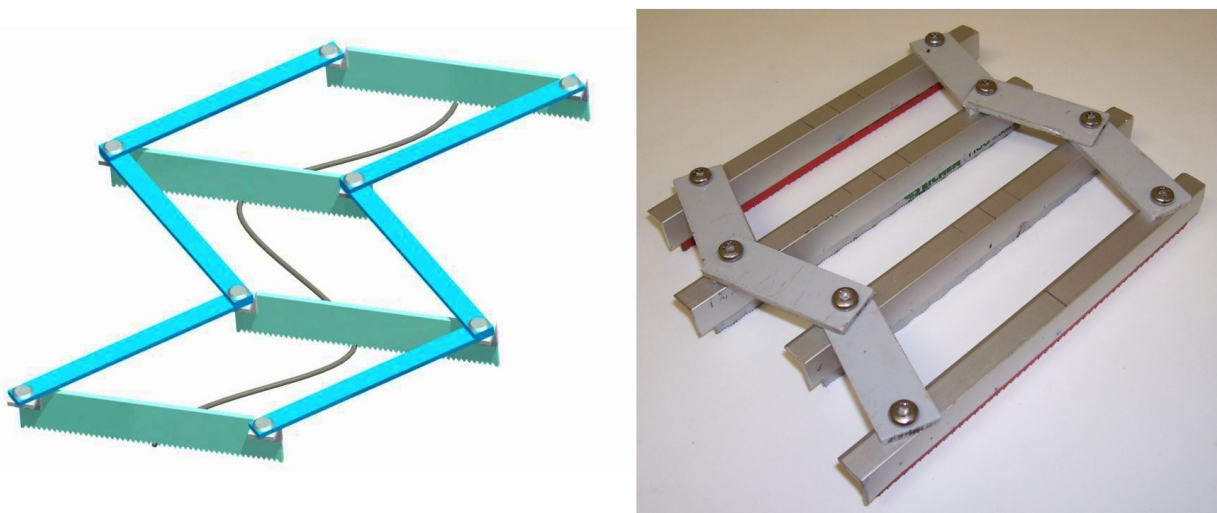


Abbildung 35: Virtueller und realer Fertigungsprototyp – Version 2

fahr zu groß ist. Da nur sehr feine Prepregs (Lagendicke 0,25 mm) zur Verfügung standen und eine Verarbeitung unter hohem Druck und hoher Temperatur nicht möglich war, konnten keine reproduzierbar verformten Proben hergestellt und keine Zugversuche durchgeführt werden.

Wickeln

Neben den flächigen Halbzeugen ist die Verarbeitung von Rovings sehr verbreitet. Dieses fadenförmige Endloshalbzeug wird gewickelt und durch die Fadenvorspannung gestreckt. Um einen

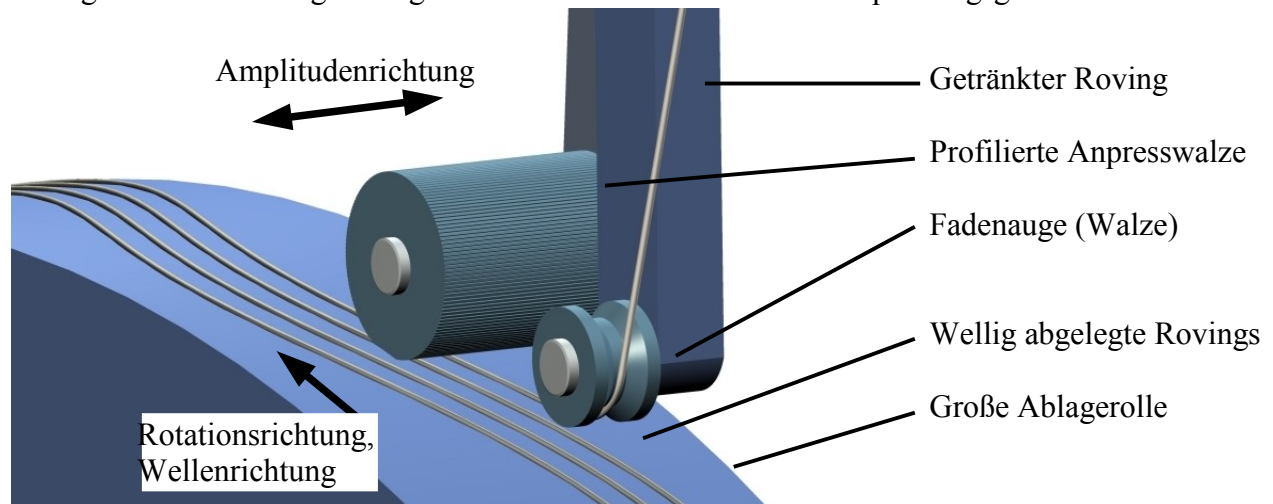


Abbildung 36: Modifizierter Wickelkopf zum Legen welliger Fasern

Roving gewellt abzulegen wäre es denkbar, dass ihn ein wanderndes Fadenauge nichtgerade auf einem großen Durchmesser (oder einer Ebene) ablegt. Dies ist mit numerisch gesteuerten Wickelmaschinen möglich, wobei der komplette Laminataufbau simuliert und optimiert werden kann. Um trotz der Welligkeit eine relativ hohe Fadenvorspannung zu erreichen, ist eine mitwandernde Anpressrolle nötig, siehe Abbildung 36.

Für die Fertigung von gewickelten gewellten Bauteilen ist eine CNC – Wickelmaschine nötig, damit die nötigen Parameter programmiert werden können. Von der praktischen Umsetzung der Idee wurde im Hinblick auf die entstehenden Kosten abgesehen.

Legen

Eine Möglichkeit zur Erzeugung von mit welligen Rovings verstärkten Kunststoffen ist das Legen der Rovings um Pins, welche die Umlenkpunkte der welligen Faser darstellen. Hierbei wird das Muster durch die Pinanordnung definiert und jeder Roving muss einzeln um die Pins gelegt werden. Per Hand ist dies ein aufwendiger Prozess und kann nur in Einzelfällen angewandt werden. In ist eine mit Pins gelegte wellige Faser zu sehen. Die Probe ist eine Einzelanfertigung für die spannungsoptischen Versuche. Der Hauptvorteil der Pin-Technik ist das Erreichen einer großen Amplitude bei kleiner Wellenlänge, d.h. es sind große Dehnungen im Laminat möglich. Als Nachteil sind die handwerklichen Schwierigkeiten und der erhöhte Aufwand für Auszugießen der Pinlöcher in der Matrix anzusehen.

Im Vergleich der beiden Bilder in Abbildung 2 erkennt man die geometrischen Faserunregelmäßigkeiten in der realen Probe, welche durch Fließbewegungen während des Gießens der Matrix entstanden sind. Das Pin-Verfahren wurde bei der Herstellung von Proben für spannungsoptische

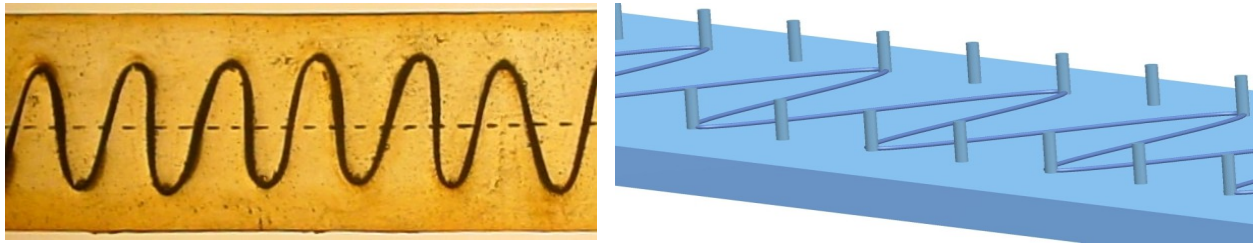


Abbildung 37: Verpinnen, li.: real CF+PU, re.: Schema

Versuche angewandt, da in diesen Proben nur maximal zwei Einzelfasern gelegt wurden. Zum Verfahren des Legens von Rovings können auch das Flechten und das Verdrehen von Rovingen gezählt werden, da dabei auch der Roving im trockenen Zustand um eine formgebende Struktur (beim Flechten die anderen Rovings und bei Verdrehen ein nachgiebiger Kern) gelegt werden.

Vergleich der Herstellungsverfahren

Die verschiedenen möglichen Verfahren zur Herstellung von wellig verstärkten nachgiebigen Kunststoffen haben jeweils Vor- und Nachteile. Welches Verfahren die in der Zielsetzung formulierten Anforderungen am besten erfüllt, soll mit Hilfsmitteln des methodischen Konstruierens ermittelt werden. Dazu wird die Nutzwertanalyse und die VDI Richtlinie 2225 genutzt. Die Anforderungen sind in Tabelle 3 zusammengestellt und mit F bzw. W als Forderung oder Wunsch bewertet. Folgende Schritte sind dafür nötig:

- Anforderungen ermitteln und Merkmale konkretisieren
- Allgemeine Funktionen und Teillösungen aufstellen
- Varianten benennen, Merkmale gewichten, Varianten bewerten

Diese Bewertung bildet die Grundlage für die Gewichtung der Merkmale im Bewertungsschema. Neben der Forderung nach einer genauen, variablen und in großen Stückzahlen produzierbaren Welligkeit sind die Laminierbarkeit und Nutzbarkeit gängiger Faserhalbzeuge gefordert. Wünsche, wie geringe Kosten, leichte Reinigung und ein einfaches Handling sind nur zweitrangig. Mit verschiedenen Methoden der Ideenfindung, wie Recherchen und Brainstorming, und gleichzeitigen praktischen Versuchen wurde nach Möglichkeiten der prinzipiellen Lösung von definierten Teilfunktionen der Erzeugung von Faserwelligkeit gesucht. Im ersten Teil der Tabelle 4 sind den fünf allgemeinen Funktionen des Fertigungsprozesses entsprechende prinzipielle Teillösungen zugeordnet. So entsprechen in Phase Nr. 1 der Funktion „Halbzeug“ die Teillösungen Roving, Gewebe, Gelege und Prepreg. In Phase Nr. 3 sind zum Beispiel der Funktion „Formgebung“ die Teillösungen Verdrängen, Legen, Verzerren, Schwenken und Pressen zugeordnet. Neben praktisch getesteten Lösungen (z.B. Legen oder Greifzähne) sind auch theoretische Ideen wie RIM oder Rolle enthalten. Im zweiten Teil der Tabelle 4 sind nach der technischen Umsetzbarkeit ausgewählte Teillösungen als Varianten zusammengefasst. Dabei steht zum Beispiel Variante 1 für die Kombination der Teillösungen Roving (1.1), Pins (2.1), Greifzähne (3.2), Schwenken (3.4) und heiß Härtung (5.1). Variante 2 ist die Kombination von Roving (1.1), Rolle (2.2), Legen (3.2), Walken (4.3) und kalt Härtung (5.2). In Tabelle 5 wurden die sechs Varianten in einem Bewertungsschema miteinander verglichen.

Tabelle 3: Anforderungen an den Herstellungsprozess und deren Gewichtung

| Anforderungen | F/W |
|------------------------------------------------------------------|-----|
| - Definierte Welligkeit erzeugbar | F |
| - Laminierbarkeit | F |
| - Möglichkeit großer Welligkeitsverhältnisse | W |
| - Nutzbarkeit gängiger Halbzeuge | F |
| - Große Stückzahlen | W |
| - Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Welligkeitsverhältnisse | F |
| - Variabilität der Fertigungsparameter | W |
| - Einfache Handhabbarkeit des Prozesses | W |
| - Keine oder wenige Fehlstellen | F |
| - Keine Faserschädigungen | W |
| - Verarbeitbarkeit von heißhärtenden Matrices | W |
| - Verarbeitbarkeit von hochviskosen Matrices | W |
| - Herstellbarkeit von getränkten welligen Halbzeugen | W |
| - Leichte Reinigung | W |
| - Geringe Kosten | W |

Tabelle 4: Morphologischer Kasten zum Fertigungsprozess und mögliche Varianten

| Phasen | Funktionelle | Prinzipielle Teillösungen | | | | |
|--------|----------------|---------------------------|---------|------------|-----------|---------|
| Modell | allg. Funktion | | | | | |
| Nr. | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | Halbzeug | Roving | Gewebe | Gelege | Prepreg | |
| 2 | Faserkontakt | Pins | Rolle | Greifzähne | Formen | |
| 3 | Formgebung | Verdrängen | Legen | Verzerren | Schwenken | Pressen |
| 4 | Tränkung | RIM | Prepreg | Walken | Pinsel | |
| 5 | Härtung | heiß | kalt | | | |
| | | | | | | |
| Var 1 | Rov Pin Legen | 1.1 | 2.1 | 3.2 | 4.4 | 5.1 |
| Var 2 | Rov Rollen | 1.1 | 2.2 | 3.2 | 4.3 | 5.2 |
| Var 3 | Gelege verz. | 1.3 | 2.3 | 3.3 | 4.2 | 5.1 |
| Var 4 | Gewebe schw. | 1.2 | 2.3 | 3.4 | 4.1 | 5.1 |
| Var 5 | Prepreg press. | 1.4 | 2.4 | 3.5 | 4.2 | 5.1 |
| Var 6 | Gewebe pin. | 1.2 | 2.1 | 3.5 | 4.1 | 5.1 |

Dabei wurden nach VDI 2225 Noten von 0 – 4 (unbefriedigend – ideal) für die Umsetzung der einzelnen Merkmale vergeben. Multipliziert mit der Wichtung des Merkmals ergibt sich der Zielwert der einzelnen Prinziplösung. Die Ermittlung des Gesamtwertes einer Variante erfolgt durch die Summierung der Lösungszielwerte. Somit ist Variante 4 (Faserwelligkeit durch das Schwenken von Gewebe mit Greifzähnen, Heißhärtung und RIM Tränkung) die beste Lösung. Durch die konstruktionsmethodischen Untersuchungen wurden die empirischen Herstellungsversuche und praktischen Vergleiche der verschiedenen Verfahren bestätigt. Die praktischen Probleme wie zum Beispiel Handhabung, Tränkung und Genauigkeit konnten in den theoretischen Methoden abgebildet und bewertet werden. Die Ergebnisse bilden den jetzigen Stand der Entwicklung ab, wobei nicht auszuschließen ist, dass künftige Verfahren und Prozesse die momentane Bewertung verändern werden. Natürlich sind einzelne Verfahren für Sonderanwendungen besser geeignet als Variante 4, so eignet sich Variante 1 besser zur Herstellung von einzelfaserverstärkten spannungsoptischen Proben. Die Wichtung und Benotung der einzelnen Merkmale ist immer anwendungs- und problemspezifisch, sodass hier die Verfahren nur aus der Sicht der Anforderungsliste in Tabelle 3 analysiert wurden.

Tabelle 5: Bewertungsschema zum Herstellungsprozess (N: Note, W: Wichtung)

| | | Var 1 | | Var 2 | | Var 3 | | Var 4 | | Var 5 | | Var 6 | |
|------------------------------|-------------|-------|------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|
| Merkm | W | N | N*W | N | N*W | N | N*W | N | N*W | N | N*W | N | N*W |
| <u>Technische Merkmale</u> | 0,65 | | | | | | | | | | | | |
| - Welligkeit erzeugbar | 0,2 | 4 | 0,8 | 2 | 0,4 | 3 | 0,6 | 4 | 0,8 | 3 | 0,6 | 2 | 0,4 |
| - Laminierbarkeit | 0,15 | 2 | 0,3 | 2 | 0,3 | 4 | 0,6 | 4 | 0,6 | 3 | 0,45 | 4 | 0,6 |
| - Große Welligkeitsverh. | 0,1 | 4 | 0,4 | 3 | 0,3 | 3 | 0,3 | 4 | 0,4 | 2 | 0,2 | 2 | 0,2 |
| - Genauigkeit + Qualität | 0,05 | 4 | 0,2 | 2 | 0,1 | 3 | 0,15 | 3 | 0,15 | 1 | 0,05 | 2 | 0,1 |
| - Variabilität | 0,05 | 1 | 0,05 | 4 | 0,2 | 2 | 0,1 | 2 | 0,1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| - Keine Fehlstellen | 0,03 | 1 | 0,03 | 3 | 0,09 | 2 | 0,06 | 3 | 0,09 | 4 | 0,12 | 1 | 0,03 |
| - Keine Faserschädigung | 0,03 | 4 | 0,12 | 4 | 0,12 | 1 | 0,03 | 2 | 0,06 | 4 | 0,12 | 0 | 0 |
| - Hohe Härtemperatur | 0,02 | 4 | 0,08 | 1 | 0,02 | 4 | 0,08 | 4 | 0,08 | 4 | 0,08 | 4 | 0,08 |
| - Hohe Matrixviskosität | 0,02 | 3 | 0,06 | 4 | 0,08 | 4 | 0,08 | 3 | 0,06 | 4 | 0,08 | 3 | 0,06 |
| <u>Ökonomische Merkmale</u> | 0,2 | | | | | | | | | | | | |
| - Halbzeuge nutzen | 0,1 | 4 | 0,4 | 4 | 0,4 | 4 | 0,4 | 4 | 0,4 | 4 | 0,4 | 4 | 0,4 |
| - Kleiner Maschinenpreis | 0,02 | 3 | 0,06 | 0 | 0 | 3 | 0,06 | 3 | 0,06 | 1 | 0,02 | 2 | 0,04 |
| - Große Stückzahlen | 0,05 | 0 | 0 | 3 | 0,15 | 4 | 0,2 | 4 | 0,2 | 2 | 0,1 | 4 | 0,2 |
| - Herstellung Prepregs | 0,03 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0,12 | 4 | 0,12 | 2 | 0,06 | 4 | 0,12 |
| <u>Ergonomische Merkmale</u> | 0,15 | | | | | | | | | | | | |
| - Leichte Reinigung | 0,05 | 2 | 0,1 | 0 | 0 | 2 | 0,1 | 2 | 0,1 | 3 | 0,15 | 2 | 0,1 |
| - Gute Handhabbarkeit | 0,1 | 0 | 0 | 3 | 0,3 | 3 | 0,3 | 3 | 0,3 | 3 | 0,3 | 3 | 0,3 |
| | | | | | | | | | | | | | |
| Summe | 1,0 | | 2,6 | | 2,46 | | 3,18 | | 3,52 | | 2,73 | | 2,63 |

3 Untersuchungen flächiger N-FKV

Ausgehend von den klassischen laminierbaren FKV sind flächige Faserhalbzeuge Grundlage für die Herstellung zweidimensionaler aufeinander ablegbarer Schichten. Durch die wählbare Orientierung der einzelnen Schichten ist unter anderem eine Beeinflussung der Lamineigenschaften möglich. Flächige N-FKV nutzen flächige Faserhalbzeuge und haben zwei Dimensionen (Länge und Breite) welche wesentlich größer sind als die dritte Ausdehnung (Dicke).

3.1 Verwendete Werkstoffkomponenten für flächige N-FKV

Die flächigen Halbzeuge sollen ein möglichst weites Feld abdecken und sind mit den entscheidenden Merkmalen in Tabelle 6 zusammengefasst. Da flächige Glasfaserhalbzeuge in der Praxis am meisten eingesetzt werden, wurden in dieser Arbeit gängige flächige Standardhalbzeuge aus Glasfasern verwendet.

Tabelle 6: Merkmale flächiger Glasfaser Verstärkungshalbzeuge

| Halbzeug | Hersteller | Flächengewicht [g/m²] | Besonderheiten |
|-------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| UD EST 250 | Haufler GmbH | 250 | Unidirektional-Gelege mit Haftfadengitter, auf PE-Trennfolie |
| UD-1000 | HP-Textiles | 1000 | Unidirektional-Gelege auf Wirrfasermatte genäht |
| G-163 | R&G | 163 | Gewebe, Körperbindung |
| G-600 | R&G | 600 | Gewebe, Leinwandbindung |
| M-225 | R&G | 225 | Matte |
| Tepex dynalite 101-FG290 | Bond Laminates | 290 | Gewebe, Körperbindung, FV: 47% im Prepreg |

Sowohl flächige Gewebe als auch UD-Gelege haben Vor- und Nachteile in Bezug auf die Verwendbarkeit in N-FKV. Die Fasern sind Hauptlastträger und definieren in Abhängigkeit vom Welligkeitsverhältnis die Spannungs-Dehnungs-Kurve. Die Flexibilität des trockenen Halbzeuges und die Drapierbarkeit schlägt sich bei der Wahl des entsprechenden Fertigungsverfahrens nieder und ist in Tabelle 7 verdeutlicht.

Wie in jedem FKV haben auch in einem N-FKV beide Komponenten jeweils entscheidende Rollen. Zur Krafteinleitung in die Filamente und zu deren Schutz dient die Matrix. Bei N-FKV nimmt diese kaum Druck- und Scherkräfte auf und die Kraftübertragung zwischen den einzelnen Fasern ist relativ klein. Dadurch bilden viele einzelne Fasern im Vergleich zum homogenen Material eine gewisse Redundanz, da bei einer nachgiebigen Matrix getrennte Fasern aneinander abgleiten können und Spannungsspitzen wesentlich kleiner sind, [Klo05].

Tabelle 7: Verstärkungshalbzeuge für flächige N-FKV

| Halbzeug | Vorteile | Nachteile | Geeignete Fertigungsverfahren |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gewebe | <ul style="list-style-type: none"> – Gutes Handling – Gute Drapierbarkeit | <ul style="list-style-type: none"> – Gewebeverschlingung – Beeinflussung von Kette und Schuss | <ul style="list-style-type: none"> – Schwenken – Verpinnen |
| Gelege | <ul style="list-style-type: none"> – Ideale Ausnutzung der Fasereigenschaften | <ul style="list-style-type: none"> – Schlechte Drapierbarkeit | <ul style="list-style-type: none"> – Schwenken – Pressen |
| Prepreg (getränktes Gewebe) | <ul style="list-style-type: none"> – Gutes Handling – Definierter Faservolumenanteil | <ul style="list-style-type: none"> – Preis – Komplexer Prozess | <ul style="list-style-type: none"> – Pressen – Schwenken – Verpinnen |

Um Herstellungsmöglichkeiten abzuschätzen, wurde mit weichgemachten Duroplasten (Epoxid Harz + Weichmacher), Polyesterharz und Polyurethan Harz experimentiert, wobei der Großteil der Versuchskörper eine Polyurethanmatrix hatte. Eine Zusammenstellung der verwendeten Matrices ist in Tabelle 8 zu sehen.

Die Auswahl der Polyurethanmatrix basiert auf Ergebnissen von *Koschmieder*, der in [Kos00] die Fließeigenschaften, die Viskosität, die Faser-Matrix-Haftung und die Laminatqualität verschiedener nachgiebiger Matrices in Bezug auf Faserverstärkungen untersuchte. Daraufhin wurde das TDI-Prepolymer Airthane PPT80A von Air Products und der aromatischer Vernetzer Ethacure 300 von der Albermale Cooperation ausgewählt. Da die mechanischen Eigenschaften eines Polyurethans stark vom eingesetzten Vernetzer und der jeweiligen Volumenanteile abhängen, wurden die gleichen Mischungsverhältnisse wie bei Koschmieder angewandt. Hierbei handelt es sich um die 95% Regel. Es müssen 95% der Harzanteile vom Vernetzer umgesetzt werden. Die Berechnungsgrundlage lautet:

$$\frac{\% \text{NCO} \cdot 2,55 \cdot 95 \%}{100} = M_{\text{Härter}} \quad (3.1)$$

wobei die Isocyanat Gruppe NCO einen Wert von 3,82 % hat und $M_{\text{Härter}}$ den Härter-Massenanteil auf 100g Harz darstellt.

Tabelle 8: Verwendete Matrices für flächige N-FKV

| Matrix | Besonderheiten |
|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| UP Harz Palatal U570 TV04 | <ul style="list-style-type: none"> – Gängiges Laminierharz – 2-komponentig – Kalthärtend – Sehr hart (duroplastisch) – Dehnungen bis ca. 3 % |
| EP Harz + Dibuthylphthalat West System 105 | <ul style="list-style-type: none"> – Äußere Weichmachung = schnelle Versprödung – 2-komponentig – Kalthärtend – Mittelhart, verhärtend (duroplastisch) – Spannungsoptisch aktiv – Dehnungen bis ca. 20 % |
| PUR, PPT Airthane PPT80A Ethacure 300 [APC04], [Alb99] | <ul style="list-style-type: none"> – Kalthärtend – Mittelhart – Gute Haftung an Glasfasern – 2-komponentig – Spannungsoptisch aktiv – Niedrige Viskosität (bei 100°C giessbar) – Dehnungen bis ca. 600 % |
| PA66 [Bon03] | <ul style="list-style-type: none"> – Thermoplastische Eigenschaften – Verarbeitungstemperatur 280°C – Genauer und hoher Faservolumenanteil, 47% – Matrix im Prepreg TEPEX dynalite, 101-FG290(x)/47° |

Die Grundcharakteristika von PPT sind laut *Koschmieder*:

- niedrige Viskosität bei 80°C, 0.5 Pa s
- ausreichende Verarbeitungszeit bei 80°C, 20 min
- gute Haftung an Glasfasern
- hohe Reißdehnung, 400%
- ausreichende Reißfestigkeit, 10 MPa
- ausreichende Steifigkeit, 9 MPa bei 100% Dehnung

Diese Eigenschaften haben sich bei der Fertigung und dem Testen der Proben mit PUR Matrix bestätigt.

3.2 Versuchsaufbau und Durchführung

Um die mechanischen Eigenschaften, welche zwar prinzipiell als J-förmige Spannungs-Dehnungs-Kurve bekannt sind, bestimmen zu können, wurden für zahlreiche Versuchsreihen in Zugversuchen angelehnt an die DIN EN ISO 527 die Kraft-Weg-Charakteristika bestimmt. Zum Einsatz kam eine servohydraulische Prüfmaschine MTS 322.21 mit einem Messbereich von 100 kN und einem Messfehler von ± 15 N. Je geringer die auftretenden Lasten sind, um so größer wird folglich der relative Fehler. Aus den ermittelten Kraft-Weg Daten wurden Spannungs-Dehnungs-Kurven abgeleitet und die Tangenten E-Module für zwei Bereiche bestimmt. Da die untersuchten Werkstoffe sehr unterschiedlich waren, wurden die jeweiligen Größen der Bereiche vom charakteristischen Verlauf der nicht linearen Steifigkeitsänderung abhängig gemacht. Hierbei kamen bereichsweise die linearen Zusammenhänge des Hook'schen Gesetzes

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (3.2)$$

zum Tragen.

Außerdem wurde der empirische Steifigkeitsmodul für Sehnen E_s nach

$$\sigma = E_s \cdot \epsilon^n \quad (\text{wie 2.4})$$

ermittelt und die gewonnen Werte wurden mit den von Klute *et al.* [KCH00] definierten Bereichen für künstliche Sehnen verglichen.

Die experimentelle Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von FKV ist schwierig, da es sich hierbei um inhomogene Verbundwerkstoffe handelt und die Spannungsverteilung stark vom Laminataufbau abhängt. Die in EN ISO 527-5 beschriebene Versuchsanordnung geht von Kraft- und Verformungsmessung aus und ermittelt damit die Laminatsteifigkeit und Laminatfestigkeit. Welche Spannungszustände aber im Laminat bestehen, lässt sich dadurch nicht ermitteln. So sind die Fasern Hauptlastträger mit den entsprechend hohen Spannungen, aber jedwede äußere Messung erfasst die Dehnungen an der Oberfläche der Matrix. Weitere Einschränkungen entstehen durch die nachgiebige Matrix und die Welligkeit der Verstärkungsfasern. Auf einer nachgiebigen Matrix können keine DMS appliziert werden und durch die großen Dehnungen ist auch die von Brökel *et al.* [BrP03] beschriebene interne Platzierung von DMS nicht sinnvoll. Außerdem erzeugt die Welligkeit Querverformungen, welche den Einsatz externer Wegaufnehmer verhindert. Optische Messverfahren ermöglichen eine flächige Verformungs- und damit eine Spannungsanalyse mit den gleichen Einschränkungen wie bei den DMS. Die Verformungsmessung erfolgte durch die Verfahrenswegmessung der Prüfmaschine. Die Versuche wurden mit einer Geschwindigkeit von 5 mm/min weggesteuert durchgeführt. Bedingt durch die kleine Steifigkeit der nachgiebigen Matrix ist es relativ schwierig Kräfte in eine Struktur aus N-FKV einzuleiten. Die Flachproben aus Polyurethan konnten mit sehr kleinem Druck hydraulisch geklemmt werden.

Tabelle 9: Abweichungen der Probenabmessungen

| | EN ISO 527-5, Typ A | Proben PU |
|-----------------|---------------------|-----------|
| Länge [mm] | 250 | 250 |
| Breite [mm] | 25 | 30 |
| Dicke [mm] | 1 | 1,6 |
| Klemmlänge [mm] | 150 | 150 |
| Proben Anzahl | 5 | 4 |

Nach EN ISO 527-5 sind für verstärkte Kunststoffproben die Abmaße von 250 mm x 1 mm x 25 mm vorgesehen. Von diesen musste, bedingt durch die Welligkeit und die Fertigungsmethoden, teilweise abgesehen werden. Damit bei einer Amplitude von 10 mm ein Mindestmaß von vier Fasersträngen des 600 g/m² Gewebes die gesamte Probe durchläuft, mussten diese von 25 mm auf 30 mm verbreitert werden. Des Weiteren konnten in einem Fertigungsschritt nur gleichzeitig vier Proben mit 30 mm Breite hergestellt werden. Zwar hätten in zwei Fertigungsschritten weitere Proben gefertigt werden können, aber eine Garantie über die identischen Fertigungsparameter wie Harzmischungsverhältnis, Härtingszyklen und Welligkeitsverhältnis wäre nicht gegeben.

3.3 Mechanische Eigenschaften verstärkter Polyesterharze

Während der Entwicklung des Fertigungsprozesses für N-FKV wurden mehrere wellig verstärkte Probenreihen aus Polyesterharz hergestellt. Die Ergebnisse sind von *Paschen* und *Reinboth* in [Pas05] und [Rei05] zusammengefasst und sollen hier im Wesentlichen vorgestellt werden.

In einer ersten Versuchsreihe wurden die mechanischen Eigenschaften der reinen UP-Harz Matrix bestimmt. Es wurden Proben entsprechend EN ISO 527-5, Typ A im Gießverfahren hergestellt. Die Dicke der Proben musste aufgrund der hohen Sprödhheit und dem damit verbundenen Splintern in den Einspannungen auf 3 mm erhöht werden. Das UP-Harz wurde bei Raumtemperatur verarbeitet und mindestens 24 Stunden ausgehärtet. Auf eine Temperung wurde verzichtet, da Polyesterharze dadurch noch stärker verspröden.

Zum Vergleich der N-FKV mit ähnlichen steifen FKV wurden sowohl geradlinig als auch sinusförmig verstärkte Proben mit ungesättigter Polyesterharz und Epoxidharz Matrix hergestellt. Die Verstärkungen waren Glasleinwandgewebe 600 g/m² und Glas-UD-Gelege 250 g/m². Die geradlinig verstärkten Proben als Platten wurden in drei Schritten hergestellt. Die Verstärkungskomponenten wurden zugeschnitten und mit Pinsel und Walkrolle in einer Flachform getränkt. Danach wurden die Fasern nochmals durch Ziehen gestreckt und das Harz unter Vakuum ausgehärtet. Die wellig verstärkten Proben wurden nach dem Zuschneiden und Tränken mit dem Verzerrmechanismus verformt. Dabei wurde für alle Probenvarianten eine Amplitude von 2,5 mm und eine Wellenlänge von 120 mm verwendet. Damit ergibt sich das relativ kleine Welligkeitsverhältnis von 0,021. Die rechnerisch mögliche geometrische Dehnung beträgt nach Formel (2.10)

1,7 %. Die Versuche wurden weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 5 mm/min durchgeführt. In Tabelle 10 sind die unterschiedlich verstärkten Polyesterharz-Probenreihen gegenübergestellt. Die geringere Steifigkeit der Gewebeverstärkung basiert neben dem kleineren Faservolumenanteil des Gewebes in Belastungsrichtung auch auf dem Brechen der steifen Matrix und damit dem Strecken der miteinander verschlungenen Gewebefasern. In den Versuchen wurde dies durch zahlreiche regelmäßige (an jeder Verschlingung) Querbrüche sichtbar. Obwohl Polyesterharz Dehnungen bis ca. 3 % erträgt, versagten die Proben hier schon bei ca. 2,2 %, was auf größere lokale Dehnungen an den Verschlingung hinweist. Durch das Versagen der Matrix kommt es zu einer Schwächung des gesamten Verbundes und dieser versagt. Zum anderen ist sowohl bei den sinusförmig verstärkten Gewebeproben als auch bei den sinusförmig verstärkten Gelegeproben ein nichtlinearer Spannungs-Dehnungs-Verlauf zu erkennen. Hier verlaufen die Kurven stetig und nicht gerade, d.h. die Steifigkeit nimmt schrittweise ab.

Tabelle 10: Mechanische Kennwerte der Zugprüfungen an UP-Proben mit verschiedenen Glasfaserverstärkungen

| | UP-1 | UP-2 | UP-3 | UP-4 | EP-1 |
|------------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | G-ES gerade | G-ES 120x2,5 | P-ES gerade | P-ES 120x2,5 | P-ES gerade |
| Halbzeug | Gewebe | Gewebe | Gelege | Gelege | Gelege |
| | 600g/m ² | 600 g/m ² | 250 g/m ² | 250 g/m ² | 250 g/m ² |
| Amplitude | --- | 2,5 mm | --- | 2,5 mm | --- |
| Periode | --- | 120 mm | --- | 120 mm | --- |
| E (GPa) | 13,7 | 11,47 | 54,6 | 49,8 | 44 |
| a/λ | 0 | 0,021 | 0 | 0,021 | 0 |
| ε_{bere.} (%) | --- | 1,7 | --- | 1,7 | --- |
| ε_{expe.} (%) | 2,28 | 2,27 | 1,2 | 1,1 | 2,21 |

Dies ist auf das Brechen der Matrix und damit dem stückweise aneinander Abgleiten der gewundenen Fasern zurückzuführen, siehe Abbildung 38. In den Zugversuchen waren bei den Gelegen sinusförmige weiße Längsstreifen zu sehen, welche bei steigender Belastung zu Matrixbrüchen führten, siehe Markierungen in Abbildung 38.

Wie in Abbildung 39 zu sehen, gibt es deutliche Unterschiede zwischen den Spannungs-Dehnungs-Verläufen der verschiedenen Verbundwerkstoffe. Zum einen sind die Gewebe verstärkten Proben (UP-1 gerade und UP-2 sinusförmig) wesentlich nachgiebiger als die mit dem gestrecktem (UP-3) bzw. sinusförmigen (UP-4) UD-Gelege. Im Spannungs-Dehnungs-Diagramm fallen

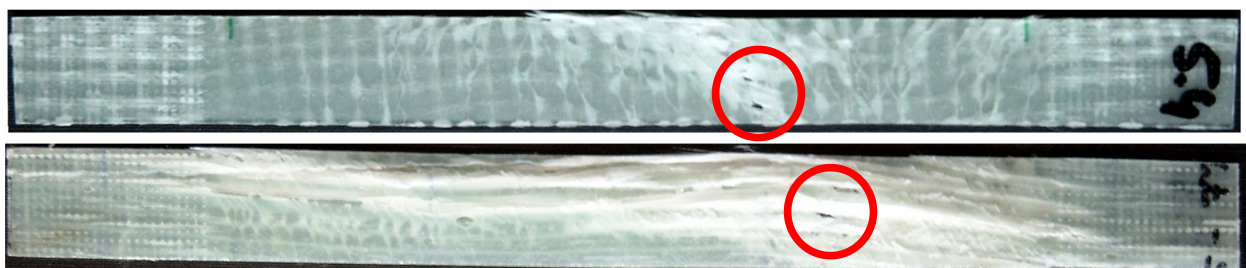


Abbildung 38: Gebrochene wellig verstärkte UP-Proben, oben Gewebe, unten Gelege

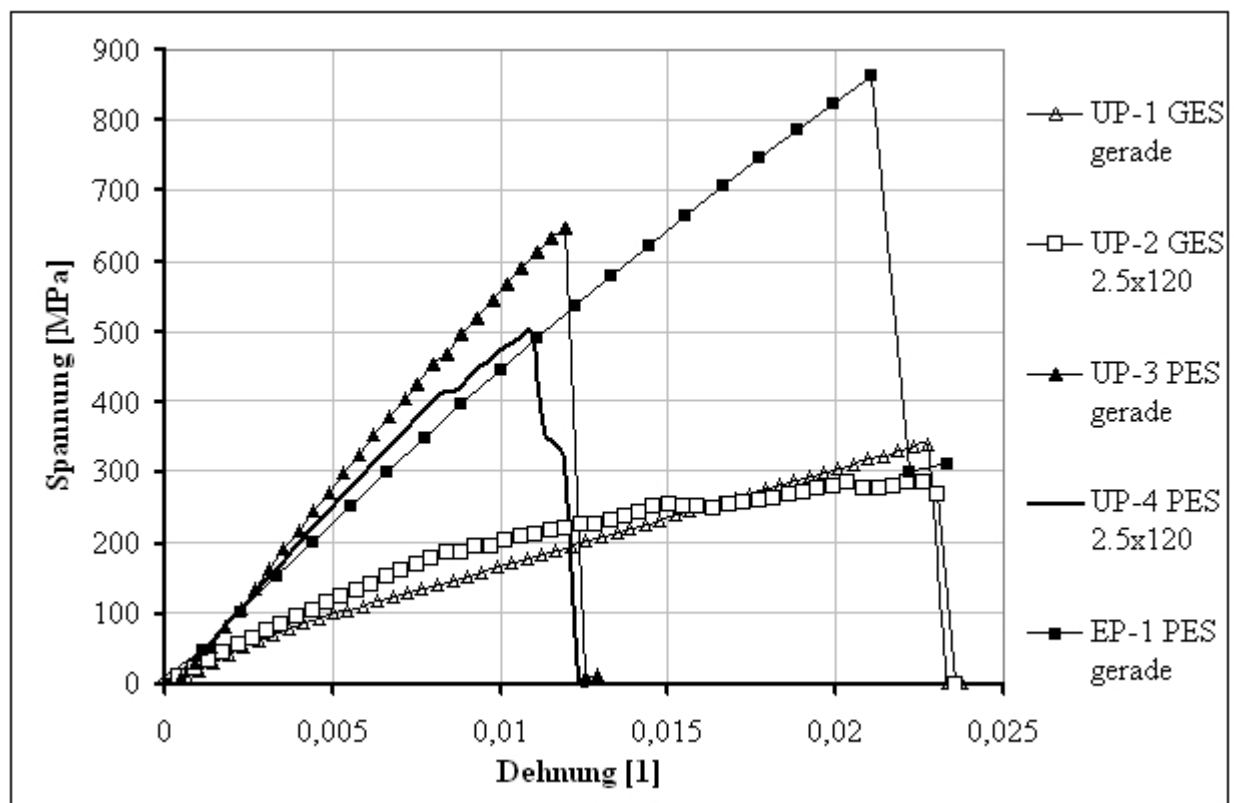


Abbildung 39: Spannungs-Dehnungs-Kurven verstärkter EP und UP Harze

besonders die mit Gelege verstärkten Epoxidharzproben (EP-1) heraus, da diese zwar nicht ganz die gleiche Steifigkeit wie die UP-Gelege erreichen, aber eine wesentlich höhere Festigkeit und Dehnbarkeit haben. Auch weisen die EP-Gelege Proben einen fast idealen linearen Verlauf auf und versagen abrupt.

In den Vorversuchen wurde der Einfluss des Halbzeuges, der Matrix und der Welligkeit auf die Eigenschaften des Komposites nachgewiesen. Zum einen sind die Proben mit Epoxidharzmatrix wesentlich fester, zum anderen erreichen UD-Gelege wesentlich bessere mechanische Eigenschaften als Leinwandgewebe. Bedingt durch die hohe Steifigkeit der UP-Harz Matrix können sich die wellig abgelegten Fasern nicht strecken und es kommt zum Schubversagen an den Einspannungen. Die typischen Versagensbilder bei den Geweben zeigen einen schrägen Bruch entlang einer Linie der größten Faserauslenkung, siehe Abbildung 40. Bei den Gelegen kommt es mehrheitlich zu Längsbrüchen zwischen den welligen Fasern. Es sind sowohl die Streckung der

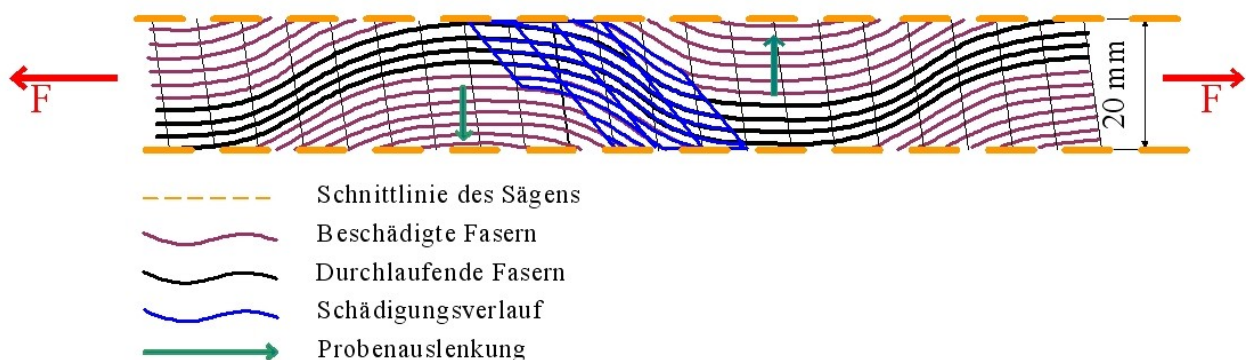


Abbildung 40: Schema des Schädigungsverlaufes für UP-2 und UP-4, [Rei05]

3D gewellten Fasern in der Gewebeverstärkung als auch die Streckung der sinusförmig (2D gewellt) abgelegten Faserverstärkungen am daraus resultierenden Steifigkeitsverlust zu erkennen.

Weitere Versuchsreihen dienten vor allem der Verfeinerung der Fertigungsmethodik. Die Fertigungs- und Zugversuche mit mehreren welligen P-ES bzw. G-ES mit steifer UP-Harz Matrix führten zu keinen verwertbaren Ergebnissen, da die Werte zu sehr streuten.

Die Versuche mit steifen Matrices deuten das Potential wellig verstärkter FKV an und versprechen große Dehnungen durch das Strecken der eingebrachten welligen Fasern in einer nachgiebigen Matrix.

3.4 Mechanische Eigenschaften von flächigen N-FKV

Um den Einfluss von Faserverstärkungen, sowohl von geraden als auch von gewellten, auf eine nachgiebige Polyurethan Matrix verstehen zu können, ist es notwendig zuerst die unverstärkte reine Matrix zu untersuchen. Dazu wurde in Versuchen der Spannungs-Dehnungs-Verlauf unverstärkter Polyurethan Proben ermittelt. Die Proben wurden im Gießverfahren als 300 mm x 150 mm große und 2 mm dicke Platten hergestellt. Aus diesen wurden die Proben mit den Maßen 150 mm x 20 mm ausgeschnitten. Die Klemmlänge betrug jeweils 50 mm und es ergab sich somit eine freie Länge von 50 mm. Die Proben wurden mit einer Geschwindigkeit von 10 mm/min weggesteuert belastet. In Abbildung 41 ist der aufgenommene Verlauf zu sehen, welcher den für nachgiebige Polymere bei Dehnungen unter 200 % typischen degressiven Anstieg aufweist. Die Versuche mussten bei einer Dehnung von 200 % abgebrochen werden, da der Verfahrweg der Testmaschine nur 100 mm beträgt.

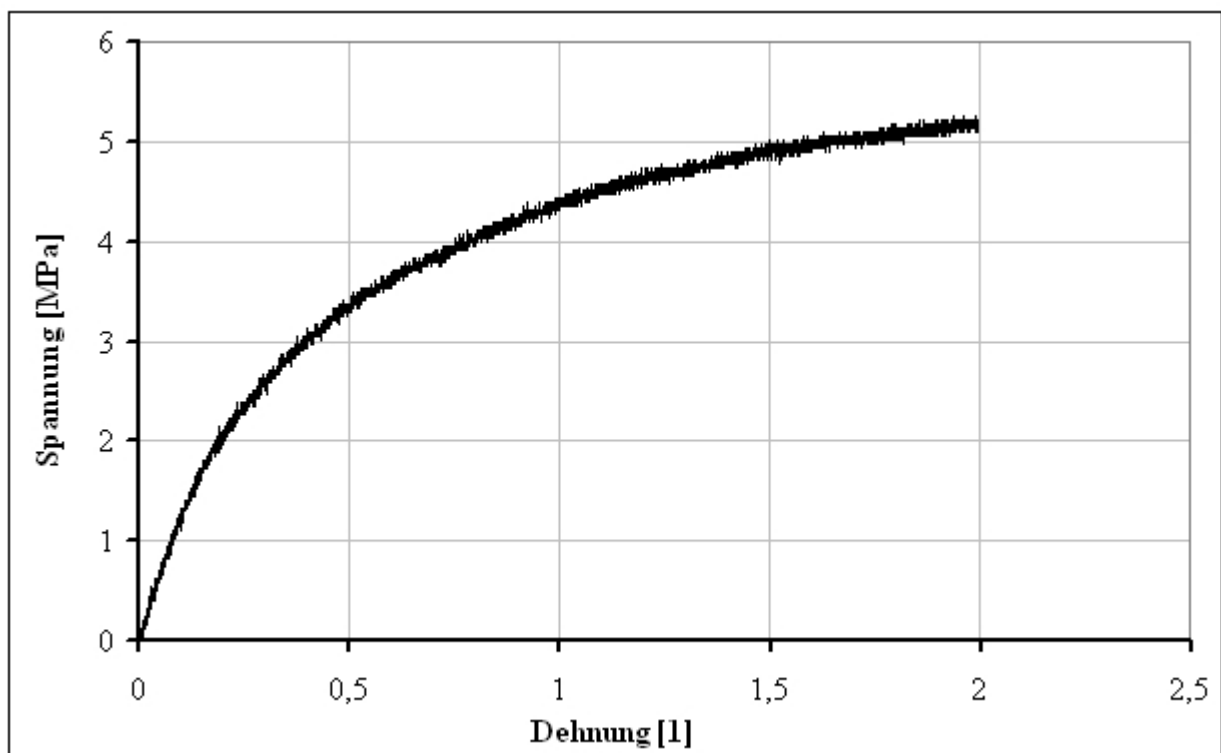


Abbildung 41: Spannungs-Dehnungs-Kurve des unverstärkten Polyurethans PPT

Außerdem kam es zu starken Einschnürungen, sodass eine sichere Einspannung durch hydraulisches Klemmen nicht gewährleistet war. Die Materialdaten reichen aber für die folgenden Untersuchungen des Einflusses der welligen Faserverstärkungen aus, da hier globale Dehnungen von nur maximal 20 % angepeilt werden und größere Dehnungen nur lokal auftreten werden.

3.4.1 Einfluss der Welligkeit auf die mechanischen Eigenschaften

Der Einfluss der Welligkeit von Faserverstärkungen auf eine nachgiebige PUR-Matrix lässt sich am besten durch den Vergleich verschiedener Welligkeitsverhältnisse des gleichen Faserhalbzeuges nachweisen. Es wurden zum einen ein 600 g/m² Leinwandgewebe aus E-Glas und zum anderen ein 250 g/m² UD-Gelege in verschiedenen Modifikationen untersucht. Beide Halbzeuge sind verbreitet in der Anwendung und zeichnen sich durch eine gute Handhabbarkeit aus. Durch die in Gleichung (2.8) gezeigte Abhängigkeit der Bogenlänge (wahre Länge der eingebetteten Faser) von Amplitude und Periode stehen die mechanischen Eigenschaften des Komposites (Festigkeit und Steifigkeit) in einem engen Zusammenhang mit der Faserwelligkeit. Zum besseren Vergleich wird das Amplituden-Perioden-Verhältnis (Welligkeitsverhältnis) a/λ genutzt. Mit dem in Kapitel 2.3.4 vorgestellten Schwenk-Verfahren wurden verschiedene im Folgenden beschriebene Amplituden-Perioden-Kombinationen der beiden Faserhalbzeuge hergestellt.

N-FKV mit 600 g/m² Glasgewebeverstärkung

Die Abbildung 42 zeigt die nach dem Welligkeitsverhältnis geordneten Ergebnisse der Zugversuche an N-FKV mit 600 g/m² Glasgewebeverstärkung. Dabei ist pro Versuchsreihe jeweils eine charakteristische Probe dargestellt. Deutlich ist das nichtlineare Verhalten der wellig verstärkten Polyurethane (3PU-26PU) im Vergleich zum geradlinig verstärkten Polyurethan (9PU) und zum

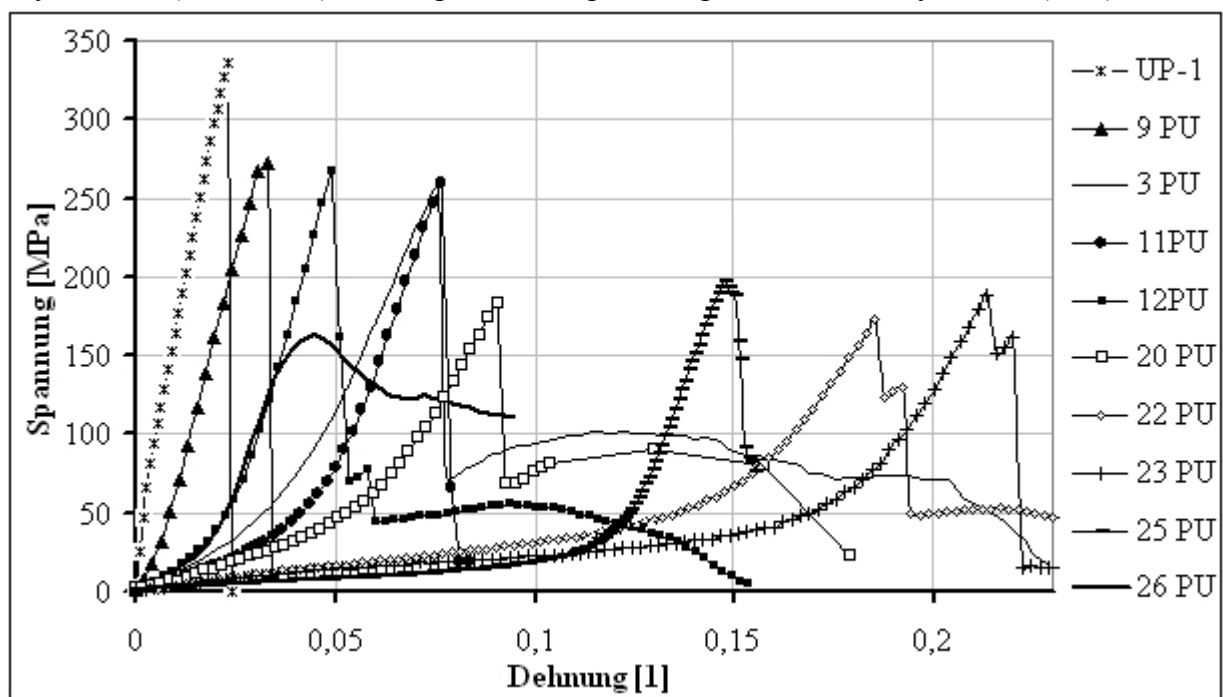


Abbildung 42: Spannungs-Dehnungs-Kurven von N-FKV mit 600 g/m² Gewebe

geradlinig verstärkten ungesättigten Polyesterharz (UP-1) zu erkennen. Das nichtlineare Werkstoffverhalten lässt sich in zwei Bereiche teilen, einem nachgiebigen Anfangsbereich mit einem geringen Tangenten Modul $E_{t,1}$ und einem steiferen Endbereich mit einem größeren Tangenten Modul $E_{t,2}$. Die Versuchsreihe UP-1, geradlinig verstärktes Polyesterharz, zeigt ein bi-lineares Verhalten (das so genannte GFK-Knie) und mit 2,37 % eine Matrix bedingte kleine Bruchdehnung. Dass sich das Leinwandgewebe trotzdem in der steifen Matrix streckte, wurde durch senkrecht zur Belastungsrichtung entstehende Matrixbrüche deutlich, was in Kapitel 3.3 näher erläutert ist. Versuchsreihe 9PU, geradlinig verstärktes Polyurethan, ist ähnlich steif, nur gibt es eine Anfangsdehnung von ca. 1 %, welche auf das nicht behinderte Strecken der Verschlingungen des Leinwandgewebes in der Matrix zurückzuführen ist. Dieses Strecken war an den Proben als Oberflächenwelligkeit zu beobachten, siehe Abbildung 43.



Abbildung 43: Probe 9PU/1 bei 4000N mit Oberflächenwelligkeit, Negativaufnahme

In Tabelle 11 sind die ermittelten E-Moduli und das Amplituden-Perioden Verhältnis a/λ für alle Versuchsreihen mit dem 600 g/m² Gewebe nach steigendem Welligkeitsverhältnis zusammengestellt. Beim Betrachten der möglichen geometrischen Dehnung $\varepsilon_{\text{gem.}}$ (durch Anzeichnen und mit einem Draht nachgemessene wellige Faserlänge in der gefertigten Probe), der berechneten Dehnung $\varepsilon_{\text{bere.}}$ (nach Gleichung (2.10)) und der experimentell ermittelten Dehnung $\varepsilon_{\text{expe.}}$ (aus Messdaten der Zugmaschine) fällt die gute Übereinstimmung auf.

Tabelle 11: Mechanische Kennwerte der Zugprüfungen an PUR-Proben mit 600 g/m² Glasgewebeverstärkung

| | 4 UP gerade | 9 PU gerade | 12 PU 70x4 | 26 PU 75x5 | 11 PU 63x5 |
|-----------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Amplitude (mm) | --- | --- | 4 | 5 | 5 |
| Wellenlänge (mm) | | | 70 | 75 | 63 |
| $E_{t,1}$ (GPa) | --- | --- | 1,6 | 1,6 | 0,8 |
| $E_{t,2}$ (GPa) | 13,7 | 9,8 | 9,5 | 8,1 | 7,3 |
| E_s (GPa) | --- | --- | 27,5 | 48 | 27,7 |
| n | --- | --- | 1,56 | 1,8 | 1,87 |
| a/λ | 0 | 0 | 0,057 | 0,067 | 0,079 |
| $\varepsilon_{\text{gem.}}$ (%) | --- | --- | 4,67 | 4,3 | 6,67 |
| $\varepsilon_{\text{bere.}}$ (%) | --- | --- | 3,3 | 4,2 | 5,8 |
| $\varepsilon_{\text{expe.}}$ (%) | 2,4 | 4,4 | 5,0 | 4,5 | 7,8 |
| $\varepsilon_{\text{Fehler}}$ (%) | --- | --- | 1,7 | 0,3 | 2 |

Fortsetzung Tabelle 11: Mechanische Kennwerte der Zugprüfungen an PUR-Proben mit 600 g/m² Glasgewebeverstärkung

| | 3 PU | 20 PU | 25 PU | 22 PU | 23 PU |
|-------------------------------|---------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| | 120x10 | 65x6 | 56x7 | 65x8.8 | 55x7.4 |
| Amplitude (mm) | 10 | 6 | 7 | 8,8 | 7,4 |
| Wellenlänge (mm) | 120 | 65 | 56 | 65 | 55 |
| E_{t,1} (GPa) | 1,3 | 0,7 | 0,1 | 0,3 | 0,2 |
| E_{t,2} (GPa) | 5,9 | 4,5 | 6,9 | 3,6 | 4,4 |
| E_s (GPa) | 22 | 20 | 18 | 15 | 9,9 |
| n | 1,73 | 2 | 2,4 | 2,83 | 2,94 |
| a/λ | 0,083 | 0,092 | 0,125 | 0,135 | 0,135 |
| ε_{gem.} (%) | 6,67 | 6,7 | 13,3 | 15,3 | 16,7 |
| ε_{bere.} (%) | 6,54 | 7,7 | 13,6 | 15,8 | 16,5 |
| ε_{exp.} (%) | 7,7 | 9,1 | 14,8 | 17,1 | 21,5 |
| ε_{Fehler} (%) | 1,16 | 1,4 | 1,2 | 1,3 | 5 |

Die Gleichung (2.9) gibt das Werkstoffverhalten der N-FKV somit gut wieder, da bei Belastung die Fasern komplett gestreckt werden. Außerdem ergibt sich eine nahezu konstante Abweichung aller errechneten Dehnungen von den experimentell ermittelten Dehnungen von 1,2 - 1,7 %. Dieser Fehler ergibt sich aus der überlagerten elastischen Faserdehnung und der Gewebestreckung, welche in die Berechnung nach Gleichung (2.9) nicht einfließt, da diese nur die reine Bogenlänge ermittelt.

Die große Abweichung zwischen berechneter und experimenteller Dehnung bei Probenreihe 23PU resultiert aus einem Fertigungsfehler, da das Harz-Härter Mischungsverhältnis nicht eingehalten wurde. Die Probenreihe wurde trotzdem in die Auswertung aufgenommen, da sie das gleiche Welligkeitsverhältnis wie Reihe 22PU hat. Die größere Dehnung ist auf die unvollständige Faser-Matrix-Bindung in der nicht vollständig ausgehärteten Matrix zurückzuführen.

Bei allen wellig verstärkten Probenreihen außer 25PU kam es mehr oder weniger zu Verformungen senkrecht zur Laminebene, siehe Abbildung 44. Hierbei knickten die Bereiche der Proben um, welche keine durchlaufenden Fasern hatten. Dieses Phänomen ist bedingt durch die kleine Biegesteifigkeit der Matrix und konnte auch bei den spannungsoptischen Versuchen beobachtet werden. Die welligen Fasern verdrängen beim Strecken Probenmaterial in Y-Richtung, welches in Z-Richtung ausweicht.

Bezüglich der Steifigkeiten und auch dem Verhältnis der beiden Tangenten E-Moduln fällt Probenreihe 25PU aus dem Rahmen. Bei dieser Versuchsreihe wurden die Proben parallel zur erzeugten Faserwelligkeit zugeschnitten. Dabei entstanden gewellte Streifen, welche sich bei zunehmender Belastung streckten und gerade wurden. Durch das weggeschnittene Seitenmaterial



Abbildung 44: Seitenansicht der verformten Probe 12PU/2 im Zugversuch

wurde der Anfangsbereich der Spannungs-Dehnungs-Kurve der Probe wesentlich nachgiebiger und die Zunahme der Steifigkeit setzte später und stärker ein. In Abbildung 45 ist die Probe 25PU/2 von links nach rechts bei steigender Belastung bis zum Versagen zu sehen. Deutlich ist das Strecken durch den markierten Faserverlauf (ganz links: sinusförmiger schwarzer Strich) und das entgegen gerichtete Verformen des geraden Strichs zu sehen. Wichtig war das Ausbleiben der Verformungen senkrecht zur Laminebene, wie es bei den nicht ausgeschnittenen Proben auftrat, siehe Abbildung 44. Die Abbildung 45 zeigt ganz rechts die gerissene und entspannte Probe 25PU/2 und es sind die weißen Bereiche, welche durch Schub entstandene Delaminationen sind, zu erkennen.

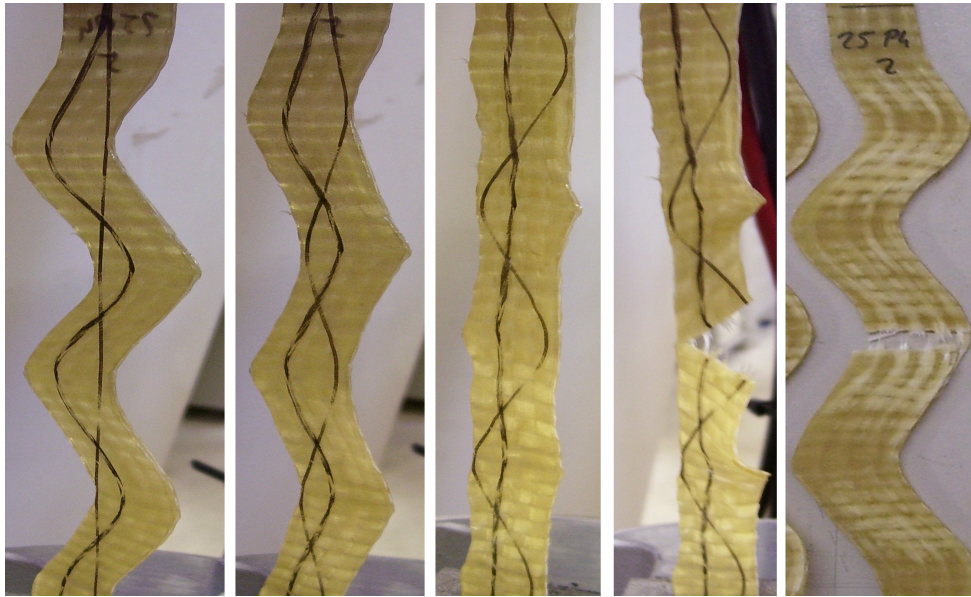


Abbildung 45: Ausgeschnittene Probe 25PU/2, Belastungsfolge bis zum Versagen

Alle verzerrten Proben hatten nach dem Versagen (erstes sprunghaftes Nachgeben) einen relativ hohen Restfestigkeitsbereich. So lag die Restfestigkeit der Reihe 3PU bei 100 N/mm^2 und ermöglichte eine Mehrdehnung von 7,7 % auf ca. 15 %. Dieses Materialverhalten ist auf die Verwendung des Leinwandgewebes zurückzuführen. Die Querfasern (Schussfäden) stellen eine wirksame Verbindung über gebrochene Längsfasern (Kettfäden) dar. Dies setzt voraus, dass die Längsfasern an verschiedenen Stellen versagen, was durch das schräge Reißen wellig verstärkter Proben bedingt ist.

N-FKV mit 250 g/m^2 UD-Glasgelegeverstärkung

Neben den Proben aus PUR mit 600 g/m^2 Glasgewebeverstärkung wurden auch verschiedene Varianten mit einer Verstärkung aus 250 g/m^2 UD-Glasgelege untersucht. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Tabelle 12 und Abbildung 46 dargestellt. Für alle gewellt verstärkten Versuchsreihen wurden die Tangenten Moduln $E_{t,1}$ und $E_{t,2}$ bestimmt. Daneben wurden die durch Gleichung (2.10) ermittelten möglichen Dehnungen berechnet und mit den experimentellen Daten verglichen. Aus den Schwierigkeiten bei der Fertigung mittels Verzerren ergeben sich relativ kleine Welligkeitsverhältnisse, wobei bei den Proben 24PU und 21PU die Rückstreckung durch ein zusätzliches Fixieren der Gelegelagen verringert wurde.

Tabelle 12: Mechanische Kennwerte der Zugprüfungen an PUR-Proben mit 250 g/m² Glaslegeverstärkung

| | EP | 8 PU | 6 PU | 24 PU | 21 PU |
|--------------------------------|--------|--------|-------|--------|----------|
| | gerade | gerade | 180x5 | 68x5,2 | 145x11,5 |
| Amplitude (mm) | --- | --- | 5 | 5,2 | 11,5 |
| Wellenlänge (mm) | --- | --- | 180 | 68 | 145 |
| $E_{t,1}$ (GPa) | --- | --- | 7,2 | 2,6 | 4 |
| $E_{t,2}$ (GPa) | 39 | 24 | 23 | 9,8 | 14 |
| E_s (GPa) | --- | --- | 105 | 110 | 70 |
| n | --- | --- | 1,4 | 2 | 1,87 |
| a/λ | --- | --- | 0,028 | 0,076 | 0,079 |
| $\epsilon_{\text{gem.}}$ (%) | --- | --- | 1,33 | 5,8 | 6,0 |
| $\epsilon_{\text{bere.}}$ (%) | 0 | 0 | 0,7 | 5,6 | 6,1 |
| $\epsilon_{\text{expe.}}$ (%) | 2,2 | 2,8 | 2,4 | 6,3 | 7,5 |
| ϵ_{Fehler} (%) | 2,2 | 2,8 | 1,7 | 0,7 | 1,4 |

Es ist zu erkennen, dass wie bei den Proben mit 600 g/m² Gewebeverstärkung eine geringe Abweichung von 0,7 % bis 1,7 % zwischen den berechneten und den experimentell bestimmten Dehnungen auftritt. Da es sich hier um UD-Gelege handelt, kann dieser Fehler nicht auf eine Streckung von Verschlingungen, sondern nur auf dem besseren Ausrichten der gestreckten UD-Fasern und auf der elastischen Faserdehnung basieren.

In Abbildung 46 sind die Spannungs-Dehnungs-Verläufe der unterschiedlichen 250 g/m² Gelege Konfigurationen zu sehen. Deutlich sind die überragenden mechanischen Eigenschaften der UD verstärkten Einzelschicht (P-ES) mit der steifen Epoxidharz Matrix zu erkennen.

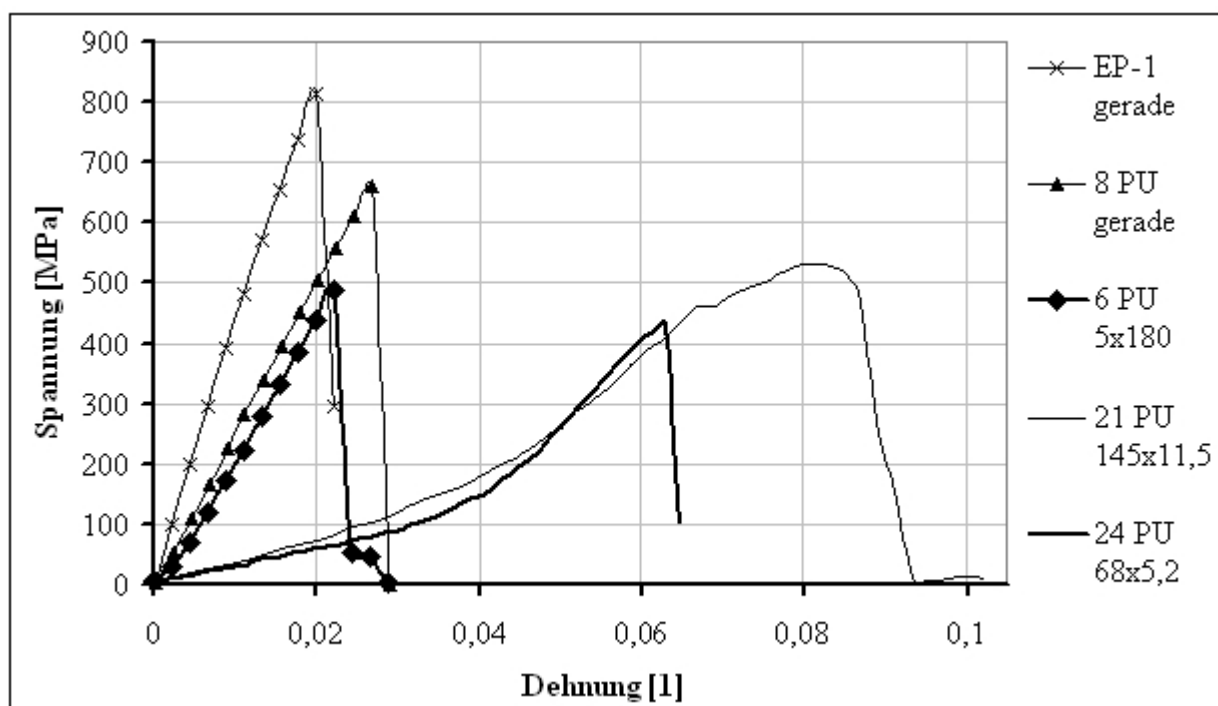


Abbildung 46: Spannungs-Dehnungs-Kurven von N-FKV mit 250 g/m² Gelegeverstärkung

Die von Moser [Mos92] angegebenen Werte einer Bruchspannung von 1062 N/mm^2 und einer Bruchdehnung von 0,038 werden nicht ganz erreicht, was am niedrigeren Faservolumenanteil (ca. 40% statt 60%) liegt. Reihe 8PU hat durch die gestreckt eingebrachten Fasern eine nahezu konstante Steifigkeit. Die Festigkeit ist kleiner als die der Epoxidharzproben, was an der kleinen Schubfestigkeit der nachgiebigen Matrix liegt. Dadurch wird die Belastung nicht oder kaum von gerissenen Filamenten auf noch intakte Filamente umgeleitet und verteilt. Die gewellten verstärkten Gelegeproben zeigen das bekannte nicht lineare Werkstoffverhalten, wobei mit steigendem Welligkeitsverhältnis die Nichtlinearität zunimmt. Interessant sind die sinkenden Steifigkeiten der Reihen 21PU und 24PU kurz vor dem Versagen. Hier scheinen im Gegensatz zu den Gewebeproben andere Versagensvorgänge stattzufinden. Des weiteren haben die Gelegeproben keine Reststeifigkeit nach dem Erreichen der Bruchdehnung. Die Proben versagten ausnahmslos abrupt, was auf das alleinige Vorhandensein von UD-Fasern zurückzuführen ist. Insgesamt können sinusförmig gelegeverstärkte PUR zwar das angestrebte nicht lineare Materialverhalten haben, aber die schwierige Fertigung und die daraus resultierenden kleinen Welligkeitsverhältnisse schränken die Möglichkeiten stark ein.

3.4.2 Einfluss des Halbzeuges auf die mechanischen Eigenschaften

Die Wahl des Halbzeuges ist ausschlaggebend für die Fertigung und die möglichen Werkstoffeigenschaften eines FKV. So hat sich in den verschiedenen Fertigungsversuchen gezeigt, dass sich Gewebe sehr gut wellig verformen lassen, da sie sich ähnlich dem Drapieren gut verschieben (Schuss gegen Kette) und nicht zurückrutschen. Es ändern sich dabei die Winkel zwischen Schuss- und Kettfäden, was bei Streckung zu einer Drehbewegung beider Fäden zueinander führt.

Anders ist es bei Gelegen. Hier werden die Längsfasern durch die Schlichte und/oder Vernähung gehalten und es gibt auch keine Querfasern bzw. Fäden, welche Schubspannungen zwischen den benachbarten Längsfasern übertragen könnten. Die Fertigung von Proben mit welliger Gelegeverstärkung erwies sich komplizierter als bei der Gewebeverstärkung. Die untersuchten Gelege UD-1000 und UD-250 (vergleiche Tabelle 6, Tabelle 7 und Tabelle 13) waren sehr steif und in ihrer Art sehr unterschiedlich. Das UD-250 ist ein feines Glasfasergelege (250 g/m^2), welches auf einer Trägerfolie durch eine Schlichte und verklebte Querfäden gehalten wird. Die Folie wird vor dem Laminieren entfernt. Das UD-1000 ist ein grobes Rovinggelege (1000 g/m^2), bei dem die parallelen Längsrovings auf eine Wirrfasermatte genäht sind. Bei beiden Glasgelegen kam es trotz einer Randfixierung zur Rückstreckung während der Aushärtung, so dass nur kleine Amplituden mit großen Perioden gefertigt werden konnten. Durch die starke Fixierung der Fasern, welche eine bestmögliche Streckung gewährleisten soll, widersetzen sich Gelege stark einer Verzerrung (Verschiebung benachbarter Fasern).

Auch das Flächengewicht des Halbzeuges beeinflusst die Fertigung. Je leichter und feiner ein Gelege/Gewebe ist, umso empfindlicher ist es gegen Schädigungen durch die Greifer mit den Widerhaken. Außerdem sind leichtere Gewebe engmaschig und daher schlechter verschiebbar. Vor allem beim 163 g/m^2 leichten Gewebe musste sehr vorsichtig gearbeitet werden und bei

Tabelle 13: Mechanische Kennwerte der Zugprüfungen an PUR-Proben mit Verstärkungen aus $1000\text{g/m}^2 + 250\text{g/m}^2$ Glasgelege und $600\text{g/m}^2 + 163\text{g/m}^2$ Glasgewebe

| | 2 PU | 21 PU | 20 PU | 27 PU |
|-----------------------------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|
| | 180x4 | 145x11,5 | 65x6 | 65x5 |
| Halbzeug | UD-1000 | UD-250 | Leinwand-600 | Körperbind.-163 |
| $E_{t,1}$ (GPa) | --- | 4 | 0,7 | 1,9 |
| $E_{t,2}$ (GPa) | 10,9 | 14 | 4,5 | 5,4 |
| E_s (GPa) | --- | 70 | 20 | 15,5 |
| n | --- | 1,87 | 2 | 1,5 |
| a/λ | 0,022 | 0,079 | 0,092 | 0,077 |
| $\varepsilon_{\text{gem.}}$ (%) | 2,67 | 6,0 | 6,7 | 4,67 |
| $\varepsilon_{\text{bere.}}$ (%) | 0,45 | 6,1 | 7,7 | 5,4 |
| $\varepsilon_{\text{expe.}}$ (%) | 4,6 | 7,5 | 9,1 | 5,9 |
| $\varepsilon_{\text{Fehler}}$ (%) | 4,15 | 1,4 | 1,4 | 0,5 |

größeren Verzerrungen (Amplitude ca. 7 mm) wölbte sich das Gewebe auf und bildete Luftblasen. Ein ähnliches Verhalten war beim Verschieben des 250g/m^2 leichten Geleges zu beobachten. Nur kam es hier nicht zu Beulen, sondern der nur mit einer Schlichte geklebte Faserverbund brach auf und einzelne Fasern streckten sich aus der Probe.

In Abbildung 47 werden die Spannungs-Dehnungs-Kurven typischer Probekörper verschiedener N-FKV Reihen verglichen, welche sich vor allem durch die verwendeten Faserhalbzeuge unterscheiden. Außer der Probenreihe 2PU (sehr schwach gewelltes 1000g/m^2 Gelege) weisen alle

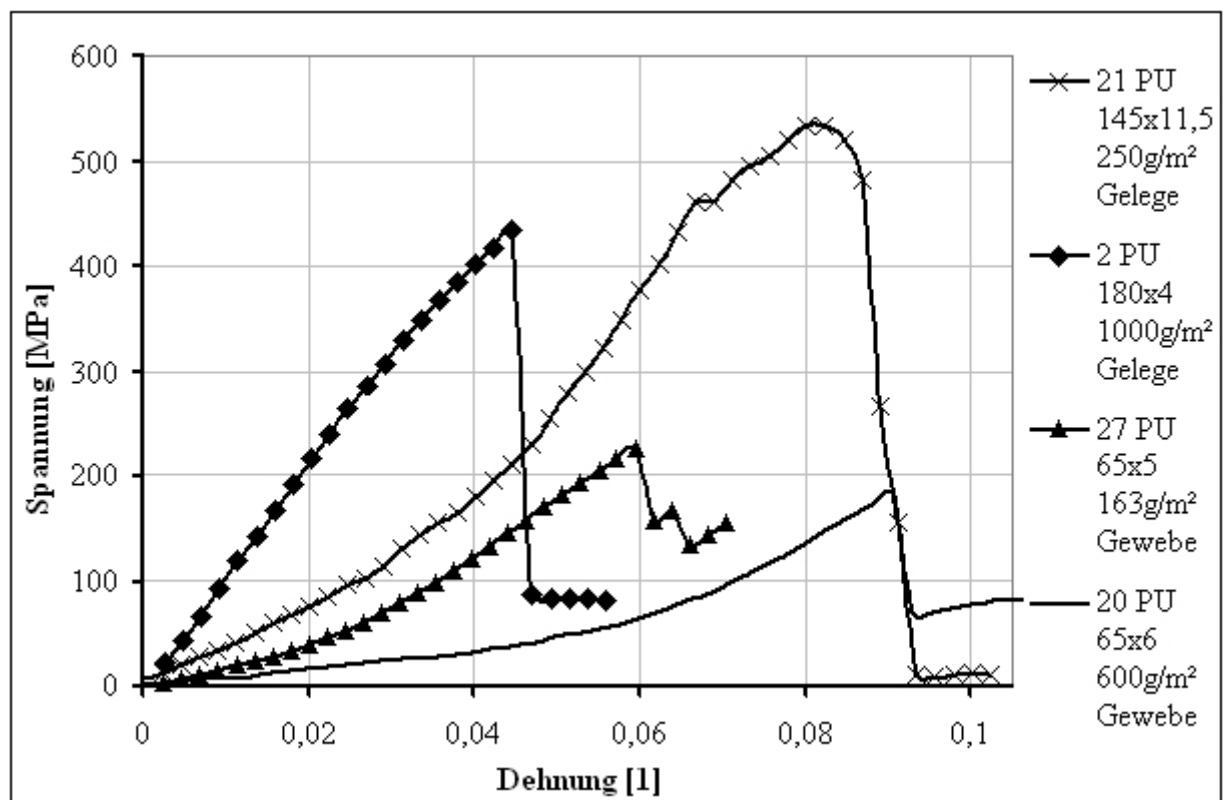


Abbildung 47: Spannungs-Dehnungs-Kurven verschiedener faserverstärkter W-FVK

N-FKV den nicht linearen Spannungs-Dehnungs-Verlauf auf. Deutlich sind auch die wesentlich größeren Festigkeiten der Gelegeprobenreihen. Bei den Gewebeprobenreihen sind die Restfestigkeitsbereiche zu sehen. Der Einfluss des Flächengewichtes auf die J-Kurve ist nicht zu erkennen, da sowohl mit schweren als auch mit leichten Halbzeugen entsprechende Nichtlinearitäten erzeugt werden konnten.

3.4.3 Die Interaktion welliger benachbarter Lagen in N-FKV

Ein Laminat besteht gängiger Weise aus mehr als einer Einzelschicht, wobei der Lagenaufbau entscheidend für die erzeugten mechanischen Eigenschaften ist. Durch das gezielte Ausrichten von Fasern in Hauptbelastungsrichtungen entstehen sehr steife und feste Strukturen.

Bei der Entwicklung von N-FKV wurde die Laminierbarkeit der gewellten Einzelschichten mit 600 g/m² Glasgewebeverstärkung experimentell untersucht und nachgewiesen, dass die Fertigung von gewellten mehrschichtigen Strukturen möglich ist. Hierbei können verschiedene Layouts erzeugt werden. So können gewellte mit gestreckten Lagen, phasengleich gewellte Lagen und phasenverschoben gewellte Lagen miteinander kombiniert werden.

Die erste Möglichkeit stellt einen Werkstoff mit zwei integrierten Eigenschaftsprofilen dar. Die gestreckte Lage kann bis zum Versagen belastet werden. Nach dem Versagen der gestreckten Lagen kommt es zu großen Dehnungen und es strecken sich die gewellten Lagen. Die zweite Möglichkeit (Kombination phasengleicher Lagen) bildet die Eigenschaften einer Einzelschicht bei höherer Zugbelastung ab. Es wird nur der Querschnitt vergrößert und das prinzipielle Werkstoffverhalten verändert sich nicht. Zu dieser Möglichkeit des Lagenaufbaus wurden die zwei Versuchsserien 16PU und 19PU untersucht. Reihe 16PU wurde aus zwei und Reihe 19PU aus drei gleich gewellten Lagen aufgebaut. Die dritte Möglichkeit, das Kombinieren phasenverschobener Lagen, wurde in den Versuchen 14PU und 15PU analysiert. Hierbei wurden zwei Lagen mit gleicher Wellenlänge und gleicher Amplitude gefertigt und um die halbe Wellenlänge versetzt aufeinander laminiert, siehe Details in Tabelle 14.

Die Fertigung erfolgte in mehreren Schritten. Zuerst wurden zwei Gewebe zugeschnitten und getränkt, wobei eins in der Ofenform und eins auf einer Folie lag. Daraufhin wurden beide Halbzeuge getrennt verzerrt und dann aufeinander platziert. Durch die nun oben liegende Folie wurde mittels einer Rolle das Laminat gepresst und Lufteinschlüsse und überschüssiger Harz heraus gedrückt. Trotz gewissenhafter Handarbeit traten vereinzelt Dickenunterschiede und Luftblasen an der Oberfläche und zwischen den Lagen auf. Die beiden zweilagigen phasenversetzten Probenreihen 14PU und 15PU zeigen im Anfangsbereich der Spannungs-Dehnungs-Kurven ein fast lineares Werkstoffverhalten, wobei die Steifigkeit im letzten Drittel der Belastung geringfügig abnimmt, siehe Abbildung 48. Die gegenläufig gewellten Faserschichten behinderten sich gegenseitig während der Streckung. Die Zwischenschicht (reine Matrix) wird dadurch auf Scherung beansprucht und versagt im Laufe der Belastung, was zu dem erkennbaren Steifigkeitsverlust führt. Außerdem bedingen die nicht gleichen Dehnungen der benachbarten Schichten interlaminaire Schubspannungen, was das Schubversagen der reinen Matrixzwischenschicht zur Folge hat. Die

Tabelle 14: Mechanische Kennwerte der Zugprüfungen an PUR-Proben mit 600 g/m² Glasgewebeverstärkung

| | 14 PU | 15 PU | 16 PU | 19 PU |
|--------------------------------|----------------|----------------|--------------|--------------|
| | 60x5 | 120x6 | 65x4 | 65x3,6 |
| Amplitude (mm) | 5 | 6 | 4 | 3,6 |
| Wellenlänge (mm) | 60 | 120 | 65 | 65 |
| Lagen Anzahl | 2 | 2 | 2 | 3 |
| Orientierung | phasenversetzt | phasenversetzt | phasengleich | phasengleich |
| $E_{t,1}$ (GPa) | 5 | --- | 2,5 | 5,5 |
| $E_{t,2}$ (GPa) | 6,7 | 7,7 | 5,6 | 7,5 |
| a/λ | 0,083 | 0,05 | 0,061 | 0,055 |
| $\epsilon_{\text{gem.}}$ (%) | 6,0 | 2,0 | 3,3 | 2,7 |
| $\epsilon_{\text{bere.}}$ (%) | 5,6 | 2,4 | 3,5 | 2,9 |
| $\epsilon_{\text{expe.}}$ (%) | 4,6 | 4,2 | 6,0 | 5,4 |
| ϵ_{Fehler} (%) | -1 | 1,8 | 2,5 | 2,5 |

in Tabelle 14 gezeigten Tangenten-E-Module und Dehnungen zeigen kein einheitliches Bild, was an Fertigungsungenauigkeiten liegen kann. Schon kleine Abweichungen zwischen den Welligkeitsverhältnissen der einzelnen Lagen eines Laminates führen zu unterschiedlichen Steifigkeitsverläufen der benachbarten Lagen. Die phasengleichen Probenreihen 16PU und 19PU unterscheiden sich durch die Anzahl der Lagen (2 und 3) und durch ein geringfügig unterschiedliches Welligkeitsverhältnis, siehe Tabelle 14. Bei beiden Versuchsreihen wurde das typische nicht lineare

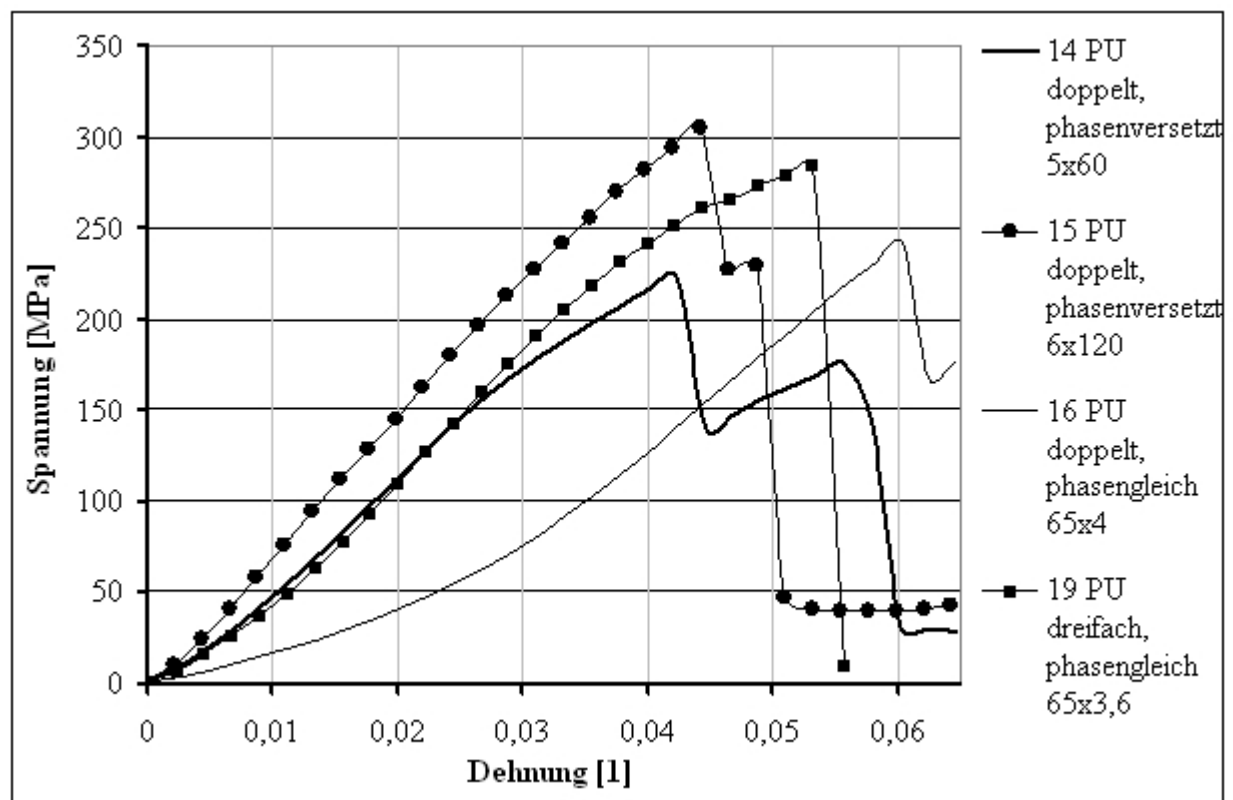


Abbildung 48: Spannungs-Dehnungs-Kurven verschiedener mehrlagiger W-FVK

Verhalten der N-FKV beobachtet, wobei die dreilagige Reihe 19PU ein Abfallen der Steifigkeit bei hoher Belastung zeigt. Das lässt auf eine ungenau Ausrichtung der Welligkeiten der einzelnen Lagen schließen, was zu unterschiedlichen Dehnungen und zum Versagen führt. Der Dehnungsunterschied zwischen berechneter und experimentell bestimmter Dehnung ist tendenziell größer als bei den einlagigen Proben, was als Streuung aufgrund variierender Fertigungsqualität zu deuten ist.

3.4.4 Dynamische Versuche an flächigen N-FKV

Neben den statischen Zugversuchen wurden auch zwei Versuchsreihen zum Abschätzen des dynamischen Verhaltens von N-FKV untersucht. Hierzu wurden vier Proben mit großen Welligkeitsverhältnissen im Schwenk-Verfahren gefertigt. Die dynamischen Zugversuche dienten nicht zum Erstellen von kompletten Wöhlerlinien und auch nicht dem Untersuchen der Dauerfestigkeit. In diesen Versuchen sollte ein Überblick gewonnen werden, wie der neue Werkstoff auf dynamische Zugbelastungen reagiert, wobei die statistische Absicherung der Ergebnisse durch die geringe Anzahl der Proben nicht gegeben ist.

Tabelle 15: Mechanische Kennwerte der Zugprüfungen an PUR-Probenreihe 22PU mit 600 g/m² Glasgewebeverstärkung

| | 22 PU / 1 | 22 PU / 2 | 22 PU / 3 | 22 PU / 4 |
|--------------------------|------------------|------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Versuch | statisch | dynamisch | dynamisch | dynamisch |
| Steuerung | Weg | Kraft | Kraft | Kraft |
| Minimal Kraft [N] | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Maximal Kraft [N] | 1609 (100%) | 960 (60%) | 960 (60%) | 960 (60%) |
| Maximal Weg [mm] | 28,9 (100%) | 26 (90 %) | 26 (90 %) | 26 (90 %) |
| Zyklen | 1 | ca. 100 | ca. 190 | ca. 415 |
| Versagensort | Einspannung | Einspannung | Einspannung | vor Umlenkpkt. |
| Besonderheiten | - verwölben | - verwölben | - verwölben - Änderung der Einspannung | - ausgeschnitten - Änderung der Einspannung |

Die Versuchsreihe 22PU bestand aus vier Polyurethanproben, welche mit dem 600 g/m² Glasleinwandgewebe wellig verstärkt wurden. Die Proben wurden mit dem Schwenkmechanismus als Platte gefertigt und zugeschnitten. Probe 22 PU/1 wurde statisch getestet, wobei die Versagenskraft (1609 N) und die Bruchdehnung (17,1 %) ermittelt wurde. Die Probe versagte nach starken Verwölbungen an der Einspannung. Die weiteren Proben wurden kraftgesteuert schwellend von 0 kN bis 60% der Versagenskraft mit einer Frequenz von 0,5 Hz belastet. Dabei wurden die Proben bis auf 90 % der Bruchdehnung verformt. Bei allen dynamisch belasteten Proben kam es zu Verfärbungen (weiße Streifen an den Fasern), welche durch Schubdelaminationen an den Fasern entstanden. Die Probe 22 PU/2 versagte nach ca. 100 Zyklen an der Einspannung. Dies lag vor allem am Ort der Einspannung. Zwar liefen die gewellten Fasern geradlinig aus, aber der

Einspannbereich reichte bis über die verformten Fasern. Die Fasern an der Einspannung wurden hier nicht nur auf Zug, sondern auch auf Schub belastet. Daraufhin wurde der Einspannbereich bei Probe 22 PU/3 verkleinert. Die Probe versagte nach fast 200 Zyklen wieder an der Einspannung, da der Übergang von gerader eingespannter Faser zu welliger freier Faser noch zu abrupt war. Dieser Fehler und das in Abbildung 44 gezeigte Verwölben sollten bei Probe 22 PU/4 durch das Ausschneiden (mittels Cutter-Messer parallel zur welligen Faser) der Probe behoben werden. Der gewünschte Effekt trat ein und es kam erst nach 415 Zyklen zum Versagen am ersten Umlenkpunkt nahe der Einspannung. Der Bruch entstand an dieser Stelle, da hier der ausgeschnittene Bereich ausläuft und daher eine Querschnittsänderung erfolgt. Die Probe verwölbte sich nicht und die Verfärbungen durch Schubdelaminationen waren wesentlich kleiner.

Die Probenreihe 23 PU wurde analog zu Probenreihe 22 PU gefertigt und mit einer Frequenz von 0,5 Hz getestet. Probe 23 PU/1 wurde statisch belastet und Bruchkraft (1812 N) und Bruchdehnung (21,5 %) ermittelt. Die Proben 23 PU/2 und 23 PU/3 wurden kraftgesteuert mit 1000 N bzw. 500 N (55 % bzw. 27 % der Bruchkraft) schwellend beansprucht. Beide Proben verwölbten sich und versagten an bzw. nahe der Einspannung. Die kleine Verschiebung der Einspannung um 15 mm erhöhte die Zyklenanzahl von 224 bei Probe 23/2 auf über 1670 bei Probe 23/3, wobei letztere zwischen erstem Umlenkpunkt und Einspannung zerriss. Probe 23/4 wurde Weg gesteuert um 28,8 mm gedehnt und hielt den Belastungen mehr als 6400 Zyklen stand. Die Probe war auch etwas kürzer eingespannt, damit die Fasern gerade in den Klemmbereich einlaufen.

Tabelle 16: Mechanische Kennwerte der Zugprüfungen an PUR-Probenreihe 23PU mit 600 g/m² Glasgewebeverstärkung

| | 23 PU / 1 | 23 PU / 2 | 23 PU / 3 | 23 PU / 4 |
|--------------------------|------------------|------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Versuch | statisch | dynamisch | dynamisch | dynamisch |
| Steuerung | Weg | Kraft | Kraft | Weg |
| Minimal Kraft [N] | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Maximal Kraft [N] | 1812 (100%) | 1000 (55%) | 500 (27%) | 766 (42%) |
| Maximal Weg [mm] | 32,9 (100 %) | 33,7 (91 %) | 28,9 (88 %) | 28,8 (89 %) |
| Zyklen | 1 | 224 | ca. 1670 | ca. 6430 |
| Versagensort | Einspannung | Einspannung | vor Einspannung | vor Umlenkpkt. |
| Besonderheiten | - verwölben | - verwölben | - verwölben - Änderung der Einspannung | - verwölben - Änderung der Einspannung |

Die während des Streckens auftretenden Schubspannungen an den Faserflanken führten zu Delaminationen innerhalb und zwischen den Fäden des Gewebes, vergleiche Abbildung 49. Der entstehende Steifigkeitsverlust führte nicht direkt zum Versagen. Die Probe wurde bei gleicher schwellender Last mit jedem Zyklus mehr gedehnt, bis die Maximaldehnung erreicht war und die Probe durch den geschwächten Verbund versagte. Mehrere Proben versagten an oder sehr nahe den Einspannungen bei sehr kleinen Lastzahlen, was die Aussagekraft der Versuche sehr ein-

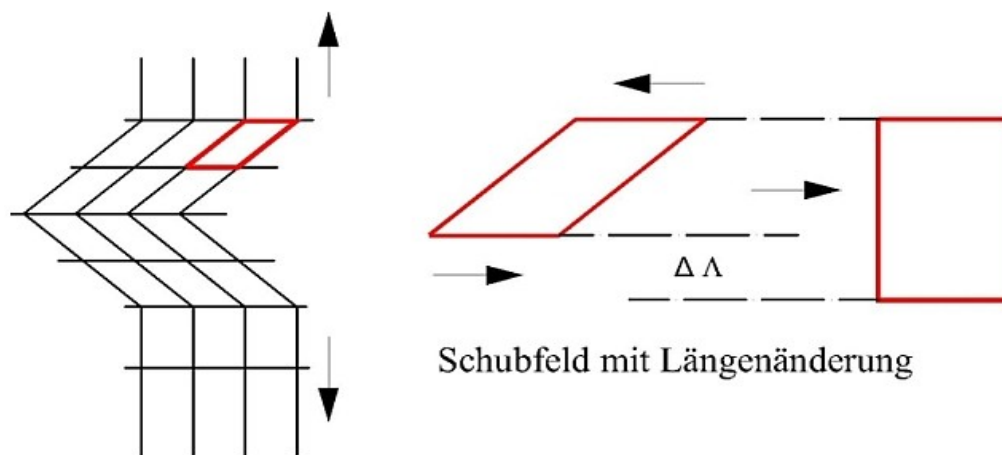


Abbildung 49: Gewebeverzerrung und entstehendes Schubfeld mit Längenänderung

schränkt. Hierbei war es entscheidend, wie und in welchem Abstand die welligen Fasern in die Einspannklemmen einliefen.

Die Proben 22PU/1, 22PU/2, 23PU/1 und 23PU/2 versagten direkt am Anfang der Klemmen, weil die Fasern nicht gerade, sondern noch wellig verliefen. Um diesen Fehler zu umgehen, muss das Welligkeitsverhältnis vor und in den Einspannbereichen gegen Null gehen, Abbildung 50.

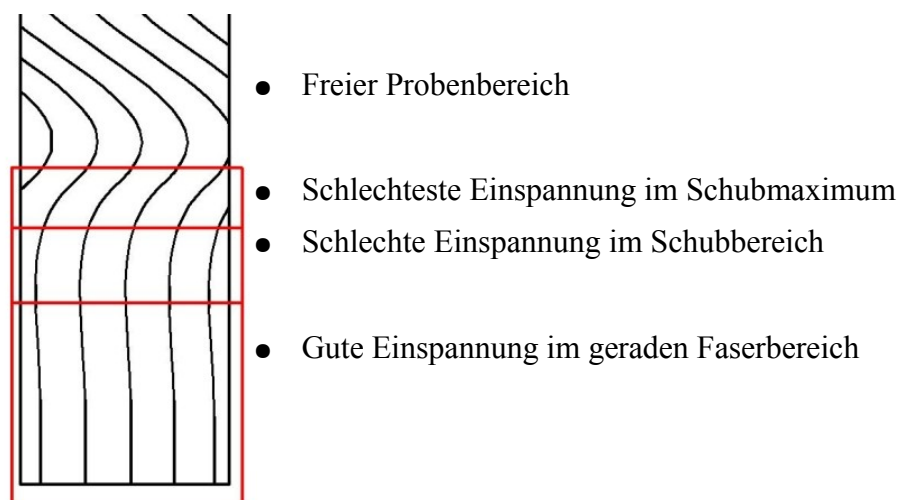


Abbildung 50: Einspannungen von N-FKV Proben

Um die Verwölbung der Proben zu vermeiden, wurde Probe 22PU/4 ausgeschnitten, siehe Abbildung 51. Es fand keine Verwölbung statt, aber die Probe versagte nach der Einspannung am Übergang vom geschnittenen zum geraden Bereich. Hier wurde nicht genug abgeschnitten und es kam lokal zum Schubversagen. Im Vergleich zu den anderen nicht ausgeschnittenen Proben wa-

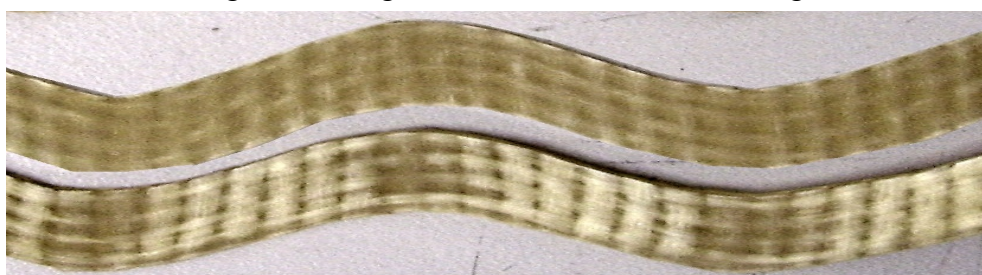


Abbildung 51: Probe 22PU/4, oben vor dem Versuch, unten nach 400 Lastwechseln

ren keine Delaminationen sichtbar. Dies lässt auf wesentlich kleinere Schubspannungen an den Faserkreuzungen schließen. Durch das Freischneiden wurden die seitlichen nichttragenden Bereiche entfernt, was bei den dynamischen Belastungen zu kleineren Schubspannungen führte.

3.5 Spannungsoptische Versuche und Finite-Element-Analysen von flächigen N-FKV

Besonders bei inhomogenen Werkstoffen wie Kompositen und Sandwich-Strukturen ist die Spannungs- und Dehnungsverteilung bei Belastung von großem Interesse. Bedingt durch die Interaktion verschiedener Materialien (Werkstoffkomponenten) kommt es zu Sprüngen in den Materialeigenschaften (Inhomogenität), welche Spannungsspitzen und Grenzflächenprobleme bedingen. Bei der Werkstoffanalyse sind diese Bereiche durch punktuelle Messverfahren (DMS) schwer zu erfassen, siehe *Brökel et al.* [BrP03]. Moderne optische Dehnungsmessverfahren messen an der Oberfläche und zeigen die Interaktion von Faser und Matrix nicht. Die Strukturanalyse wird heutzutage, bedingt durch die Finite-Elemente-Methode, vorwiegend am Computer durchgeführt und die entwickelten Werkstoffmodelle werden durch reale Werkstoffversuche validiert. Schwierigkeiten bereiten aber Werkstoffinhomogenitäten weiterhin. Wenn diese gepaart mit großen Dehnungen und stark nicht linearem Werkstoffverhalten auftreten, dann sind für eine FEA langjährige Erfahrung und Expertenwissen notwendig. Ein Versuch der Simulation von flächigen N-FKV per FEA wird im Folgenden vorgestellt. Die Spannungsoptik ermöglicht es, einen geeigneten Werkstoff ohne Computersimulationen flächig zu analysieren. Der Effekt besteht darin, dass bei mechanischer Belastung eines entsprechenden Modells eine optische Anisotropie entsteht, die in Polariskopen sichtbar gemacht wird.

3.5.1 Spannungsoptische Versuche

Horridge et al. entdeckten schon 1955 Mikrorisse in der Matrix von FKV durch das Nutzen einer spannungsoptisch aktiven Matrix, [Hor55]. Weitere spannungsoptische Untersuchungen an FKV wurden 1965 am Institut für Werkstoffkunde der TH-Hannover durchgeführt [Ehr67] und auch *S. Lütze* [Lüt02] nutzte die Methode für experimentelle Untersuchungen des Schädigungsverhaltens von FKV. Zwar wurden diese Untersuchungen an kurzfaserverstärkten Kunststoffen durchgeführt, aber durch die verwendete gut auflösende Optik sind die Resultate gut. Wie im VDI-Forschungsbericht 158 beschrieben, benutzt *A. Tenzler* [Ten94] die Spannungsoptik zur Untersuchung von FKV. Zwar stehen hier Schlagbelastungen im Vordergrund, aber die Anwendung des spannungsoptischen Oberflächenschichtverfahrens bestätigt die positiven Erfahrungen von *S. Lütze*. Im zirkularen spannungsoptischen Versuchsaufbau, siehe Abbildung 52, wird polarisiertes Licht, das ein ebenes transparentes und belastetes Modell durchstrahlt, entsprechend der einwirkenden Belastungen in zwei senkrecht aufeinander stehende Teilwellen zerlegt. Photoelastische Kunststoffe agieren im spannungsfreien Zustand optisch isotrop, werden jedoch unter mechanischer Beanspruchung anisotrop. Die dabei erfolgende Veränderung des Brechungsindex ist abhängig von der aufgebrachten Belastung.

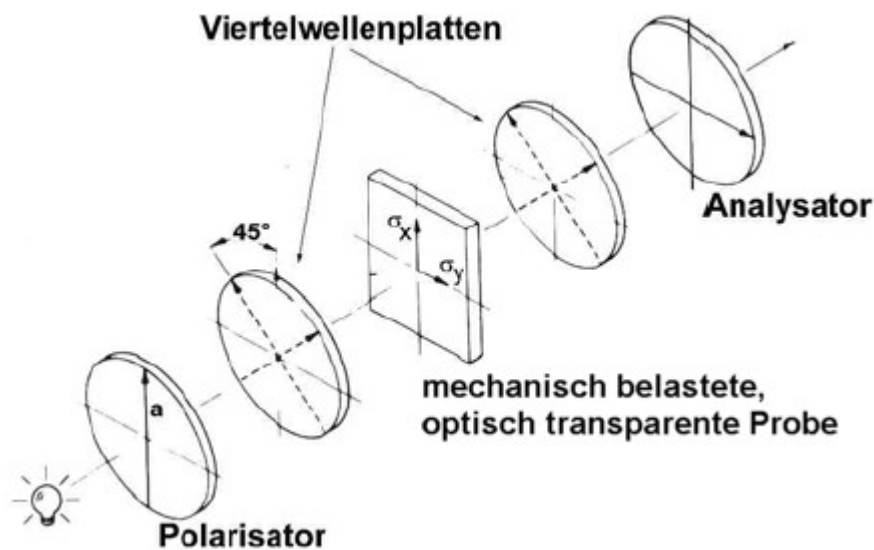


Abbildung 52: Aufbau des zirkularen spannungsoptischen Versuchstandes, nach [Wol76]

Dies beschreibt das Brewster'sche Gesetz, welches sagt, dass die Differenz der Brechungsindizes proportional zur Differenz der Hauptdehnungen und damit der Hauptspannungen ist, siehe Gleichung (3.3).

$$(n_x - n_y) = K \cdot (\epsilon_x - \epsilon_y) \quad (3.3)$$

Wenn polarisiertes Licht einen photoelastischen Körper der Dicke d durchleitet, zerfallen die Komponenten des polarisierten Lichtvektors in Richtung von ϵ_1 und ϵ_2 bzw. σ_1 und σ_2 , wobei die Dehnungen die Durchtrittsgeschwindigkeit dieser Komponenten ändern und eine Phasenverschiebung hervorrufen. Es entsteht ein Bild aus dunklen und hellen (farbigen) Streifen, deren Anordnung zuverlässige Rückschlüsse auf Verteilung und Größe der mechanischen Spannung an allen Stellen des Modells erlaubt. Ändern sich die Spannungen im durchstrahlten Material, dann ändern sich die Durchtrittsgeschwindigkeiten und somit die Phasenverschiebung. Jeder Spannungszustand erzeugt somit ein spezifisches sichtbares Bild, welches in Abhängigkeit von der verwendeten Optik eine nahezu infinitesimal genaue Auflösung und die Analyse örtlich konzentrierter Spannungen ermöglicht. Außerdem ist es im Gegensatz zur FEA nicht nötig, den Ort der Spannungskonzentration im Voraus zu kennen, da kein FE-Netz verfeinert werden muss, um die Genauigkeit zu erhöhen [Wol76]. Für die spannungsoptischen Versuche sind spezielle Proben nötig, welche durchstrahlbar sind und welche die Matrix-Faser-Interaktion deutlich darstellen, [BrS06b]. Als Matrix kommt bei den N-FKV Polyurethan zum Einsatz. Die mechanischen und spannungsoptischen Werkstoffeigenschaften von PUR sind in Tabelle 17 zusammengestellt. Der Einsatz eines gummielastischen Modellwerkstoffes wie PUR erlaubt große Dehnungen, geht aber aufgrund der spannungsoptischen Konstante mit dem Verzicht auf erhöhte Genauigkeit einher. Die praxisnahe Verstärkung der nachgiebigen Matrix mit flächigen Glasfaserhalbzeugen konnte

in den spannungsoptischen Versuchen nicht eingesetzt werden, da das flächige Glasfasergebilde das polarisierte Licht streut und eine Durchstrahlung nicht möglich macht.

Tabelle 17: Materialkennwerte von PUR

| | Polyurethan nach [Wol76] | Polyurethan PPT80A [APC04] |
|-----------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Festigkeit [MPa] | 0,1 - 0,3 | 16 |
| Steifigkeit [MPa] | 3 - 13 | 4,8 – 6,2 |
| Materialkonstante S [N/mm*n] | 0,1 - 0,5 | --- |
| Gütezahl Q [n/mm] | 20 - 70 | --- |
| μ | 0,46 | --- |
| max. Dehnung [%] | sehr groß | 770 |

Es wurden einzelne definiert gewellte Kohlenstoffrovings mit dem Verpinverfahren in die Matrix eingebracht. Als Stifte zur Führung der Rovings wurden Stecknadeln verwendet, um die Löcher in der Matrix möglichst klein zu halten. Die Stifte sind vor allem bei den Proben mit einem großen Amplituden / Perioden Verhältnis nötig, da sich der getränkte Roving sonst strecken würde. Statt eines CF-Rovings wurde in einer Probe ein Metallgelenk eingebettet. In Tabelle 18 sind für die untersuchten Proben die Welligkeitsparameter und die mechanischen Eigenschaften zusammengestellt und Abbildung 53 zeigt die unbelasteten Proben. Im Vergleich zu den mit flächigen Halbzeugen verstärkten N-FKV Proben werden hier Welligkeitsverhältnisse von 0,1 bis 0,5 erreicht. Damit soll gewährleistet sein, dass die Faser-Matrix Interaktion deutlich zu erkennen und der Einfluss der Welligkeit groß ist.

Tabelle 18: Kennwerte spannungsoptischer Proben aus PUR mit welliger Verstärkung

| | SO-3 lange Welle | SO-4 mittlere W. | SO-5 kurze Welle | SO-6 phasenver. | SO-9 Gelenk |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------|
| Amplitude a [mm] | 10 | 10 | 11 | 10 | 12 |
| Periode λ [mm] | 100 | 43 | 20 | 46 | 30 |
| Welligkeits- verhältnis a/λ | 0,1 | 0,23 | 0,54 | 0,21 | 0,4 |
| Länge [mm] | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 |
| Querschnitt [mm²] | 60,38 | 68,8 | 71,19 | 72,68 | 69,76 |
| max. Kraft [N] | 258,4 | 272 | 266,6 | 272 | 190,4 |
| max. Dehnung [%] | 10 | 29 | 59 | 25 | 12 |
| Steifigkeit [MPa] | 37 | 17 - 13 | 13 - 7 | 15 - 7 | 50 - 20 |

Die Versuche wurden im spannungsoptischen Labor der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik der Universität Rostock durchgeführt. Die Flachproben wurden mittels Klemmen in die Zugvorrichtung eingesetzt. Hierbei wurde auf die freie Lagerung und den geraden Zug geachtet,

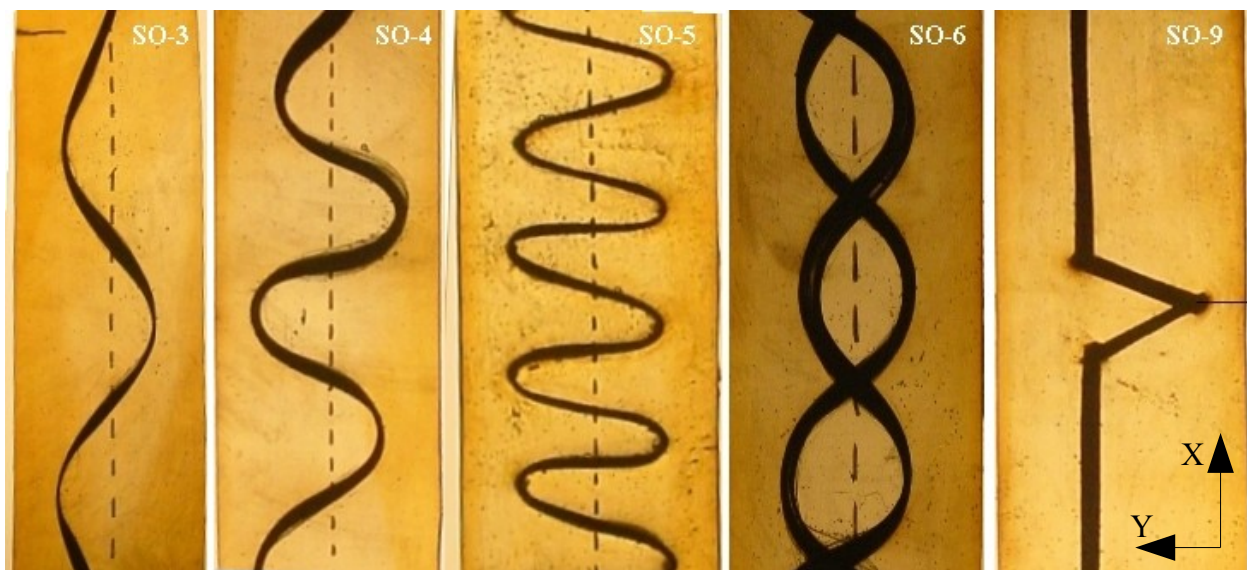


Abbildung 53: Geometrien der spannungsoptischen Proben

um Biegung zu vermeiden. Die Kraft wurde durch ein Gewinde erzeugt und mit einem Ringkraftmessbügel (Messbereich 500 N, Fehler ± 1 N) bestimmt. Die Längenänderungen wurden an parallel zur Probe angeordneten Skalen abgelesen. Beim Erfassen der Dehnungen und Kräfte wurden digitale Dunkelfeldaufnahmen gemacht.

In Abbildung 54 sind die Spannungs-Dehnungs-Kurven der untersuchten Proben abgebildet. Hierbei fällt vor allem das Fehlen der für N-FKV typischen J-Kurve auf. Dies ist auf den sehr kleinen Faservolumenanteil (ein bzw. bei SO-6 zwei Rovings pro Probe) und damit den sehr kleinen Einfluss der welligen Fasern auf die Verbundeigenschaften zurückzuführen. Trotzdem sind klare Unterschiede zwischen den Steifigkeiten zu erkennen. An den Proben SO-3, SO-4 und SO-5 ist ein Abfall der Steifigkeit mit steigendem Welligkeitsverhältnis feststellbar. Der Spannungs-Dehnungs-Verlauf gleicht mit steigendem Welligkeitsverhältnis mehr dem eines unverstärkten nachgiebigen Polymers als einem N-FKV, vergleiche Abbildung 10. Das Gelenk in Probe SO-9 bildet eine wellige Faser modellhaft in einer halben Periode nach und ist bedingt durch den sehr kurzen welligen Bereich und den großen Bereich des gestreckten Bleches nicht mit einer sinusförmigen Roving Verstärkung vergleichbar. Probe SO-9 macht aber den Einfluss der gewellten Faser auf die Matrix im spannungsoptischen Bild deutlich. Die Proben SO-4 und SO-6 haben nahezu den gleichen Steifigkeitsverlauf und ein ähnliches Welligkeitsverhältnis. Die spannungsoptischen Analysen beschränkten sich auf die Auswertung der Isochromaten. Bei der Verwendung von weißem Licht erscheinen die Isochromaten farbig und kennzeichnen Orte gleicher Hauptspannungsdifferenz. Außerdem liegen die gleichen Hauptschubspannungen und nach der Schubspannungshypothese die gleichen Beanspruchungen vor. Mithilfe der Isochromaten können die Randspannungen und lokale Spannungsspitzen ermittelt werden.

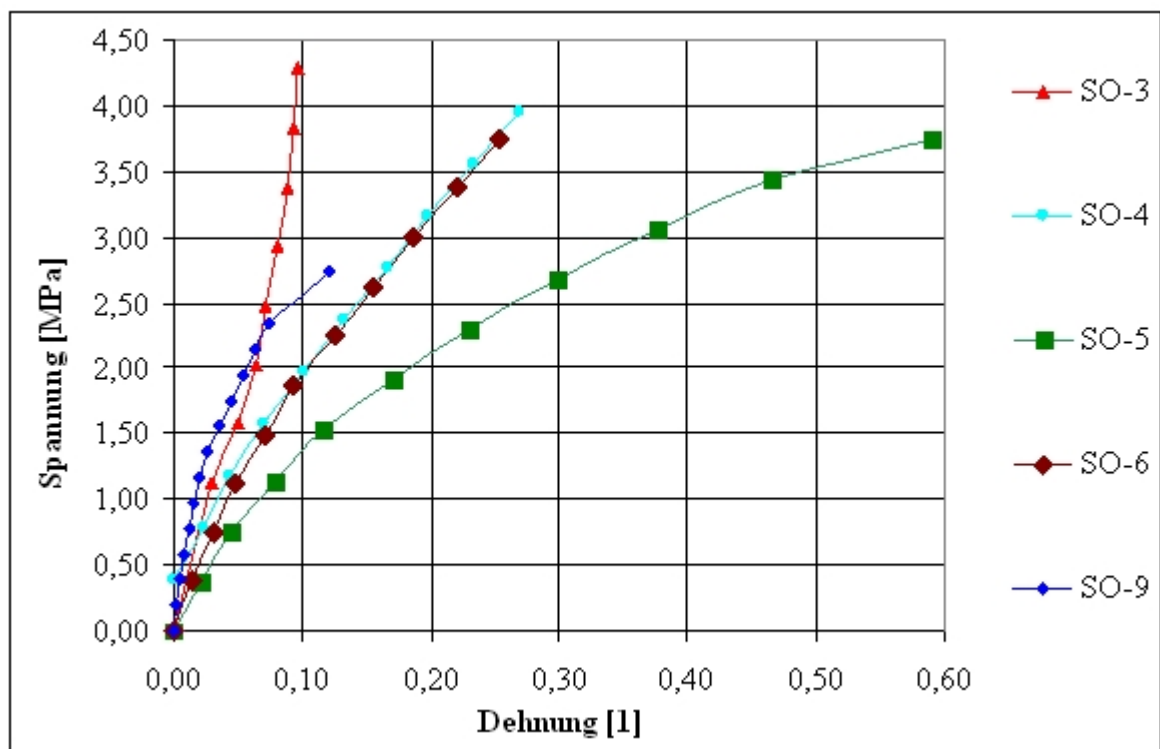


Abbildung 54: Spannungs-Dehnungs-Kurven der spannungsoptischen Proben

Die Isochromatenbilder entstehen im Dunkelfeld-Zirkular-Polariskop als dunkle Linien, wobei isotrope und singuläre Punkte als dunkle Nullpunkte in den bunten Abbildungen auffallen.

$$\begin{array}{ll} \sigma_1 = \sigma_2 = 0 & \text{singulärer Punkt} \\ \sigma_1 = \sigma_2 \neq 0 & \text{isotroper Punkt} \end{array} \quad (3.4)$$

Dichte Farbwechsel deuten auf starke Spannungsgefälle hin und stellen besonders belastete Stellen dar.

In Abbildung 55 ist die Abfolge der Dunkelfeldaufnahmen der Probe SO-3 zu sehen. In Probe SO-3 ist ein Kohlenstofffaser-Roving als lange Welle eingebettet, das Welligkeitsverhältnis ist 0,1. Deutlich sind mit steigender Last die wachsende Verformung der gestrichelten Mittellinie

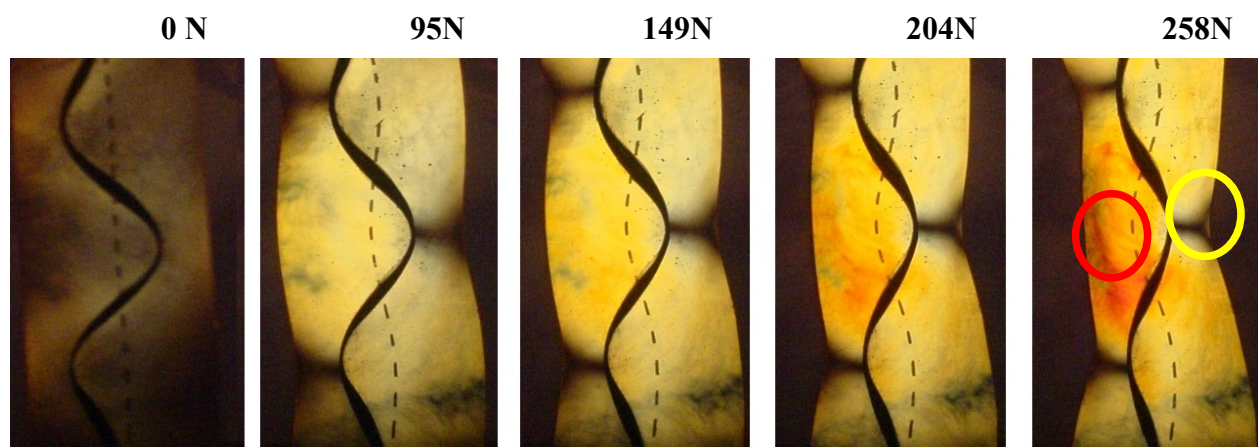


Abbildung 55: Dunkelfeldaufnahme bei steigender Belastung, SO-3

und der gewellten Kohlenstofffaser zu erkennen. Selbst ohne Belastung ist ganz links ein heller Schatten um die eingebettete Faser vorhanden, was auf Eigenspannungen durch den Aushärteprozess hindeutet. Im Verlauf der Belastung und damit der Verformung entstehen an den Extrempunkten isotrope Punkte, was eine Hauptspannungsdifferenz von Null bedeutet. Es kommt in der Dunkelfeldaufnahme nur zu minimalen Farbunterschieden. Erst ab einer Belastung von 200 N treten Verfärbungen auf, wobei diese mit dem Beulen der Probe einhergehen. Der Bereich der Verwölbung in Z-Richtung ist rot markiert. Neben der Verwölbung kommt es an dieser Stelle auch zu einer starken Einschnürung der Probe, gelbe Markierung. In diesem Bereich herrschen große Zugspannungen zwischen den ausgelenkten Rovingabschnitten und große Druckspannungen quer zur Lastrichtung.

In Probe SO-4 ist die Faser mit einem Welligkeitsverhältnis von 0,23 stärker gewellt. Wie in Abbildung 56 gezeigt, treten ähnliche Farbmuster wie bei Probe SO-3 auf. Im unbelasteten Zustand sind leichte Helligkeitsunterschiede um den Roving zu erkennen. An den Extrempunkten sind markante Punkte zu sehen (rote Markierung), wobei die dunkle Isochromate nicht bis an den freien Rand reicht, sondern sehr lokal direkt am Roving liegt. Durch das größere Welligkeitsverhält-

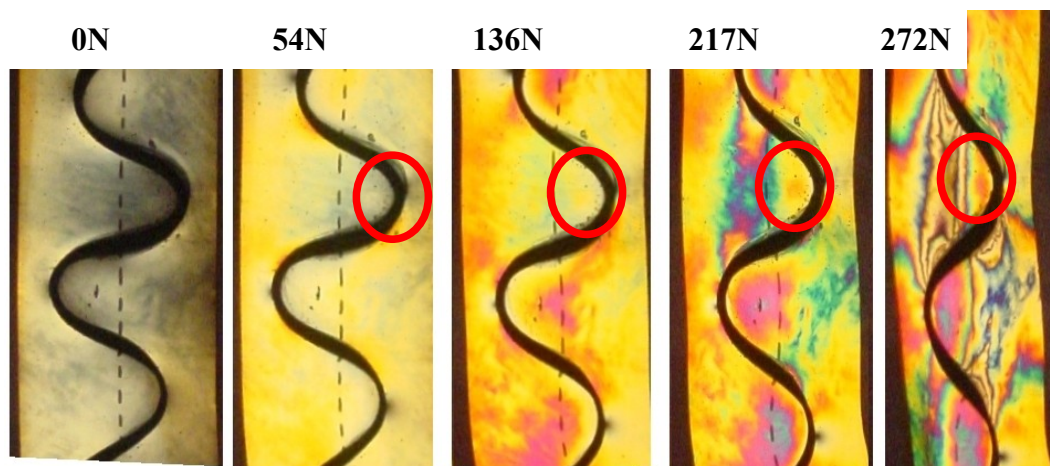


Abbildung 56: Dunkelfeldaufnahme bei steigender Belastung, SO-4

nis liegen große Bereiche des Rovings fast senkrecht zur Belastungsrichtung. In diesen Bereichen ist der Roving kaum in Faserrichtung belastet. In den Bereichen dazwischen treten dagegen Zugspannungen in der Matrix auf, was durch die enge Lage von verschiedenfarbigen Linien bestätigt wird. An den Schnittpunkten des Rovings mit der Mittellinie werden die Zugspannungen zu Druckspannungen. Der Einfluss des größeren Welligkeitsverhältnisses schlägt sich vor allem im Erscheinen der Extrempunkte und dem Beulen nieder. Es treten mit steigendem Welligkeitsverhältnis lokal größere Spannungen auf, obwohl die Steifigkeit der ganzen Probe abnimmt.

In Abbildung 57 ist der untere Teil von Probe SO-5 bei steigender Belastung als Dunkelfeldaufnahme zu sehen. Durch das große Welligkeitsverhältnis von 0,54 (die Wellenlänge ist nur doppelt so lang wie die Amplitude) hat die Probe eine kleine Steifigkeit und die erreichten Dehnungen sind groß. Da die prinzipielle Interaktion von Roving und Matrix in jeder Wellenlänge gleich ist, wird in Abbildung 57 nur ein Probenausschnitt dargestellt. Deutlich sind die Eigenspannungen im unbelasteten Zustand zu erkennen. Hierbei scheint der Roving eine Art Grenze zu bilden, welche sich auch bei steigender Belastung bis ca. 100 N hält. Bei einer Belastung von 54 N tritt

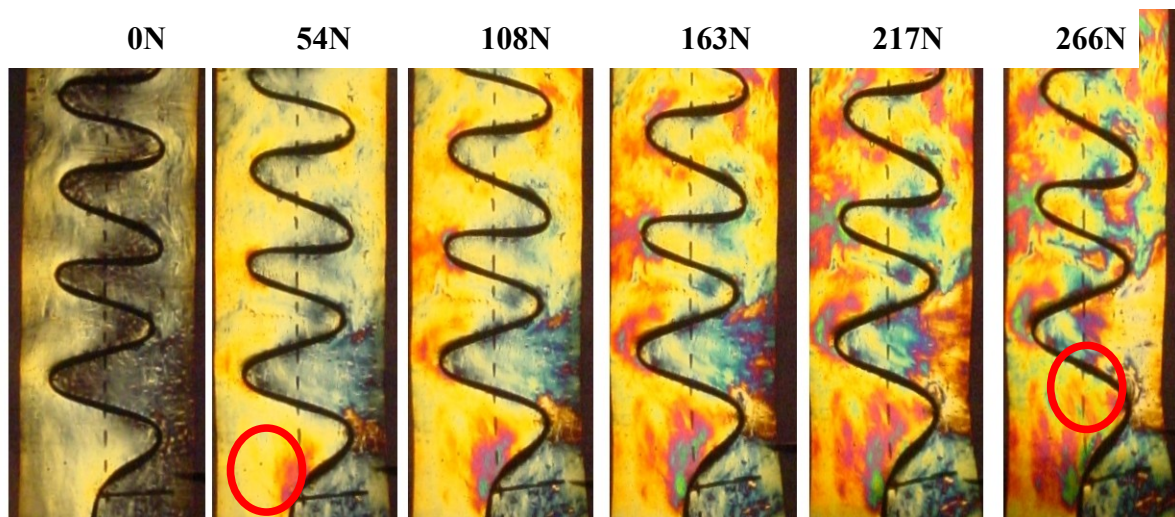


Abbildung 57: Dunkelfeldaufnahme bei steigender Belastung, SO-5 unterer Teil

eine Spannungsspitze nahe der Einspannung am Übergang des geraden Rovings in den welligen Bereich auf. Dem Trend der Proben SO-3 und SO-4 folgend ist der Einfluss der Extrempunkte bei Probe SO-5 wiederum kleiner, da das Welligkeitsverhältnis deutlich größer ist als bei den voran gegangenen Proben. Da sich der Roving während der Fertigung der Probe SO-5 zurückstreckte, mussten die Wendepunkte mittels Pins (Stecknadeln) fixiert werden. Obwohl diese während des Aushärtens (in der Gelierphase der Matrix) entfernt wurden, blieben Unregelmäßigkeiten in der Matrix vorhanden. Diese werden bei steigender Belastung deutlich sichtbar und eine ist beispielhaft bei 266 N rot gekennzeichnet. Bedingt durch das große Welligkeitsverhältnis und die im Vergleich zu den möglichen Dehnungen kleinen Verformungen treten kaum Beulen in Z-Richtung auf.

Neben dem Einfluss einer einzelnen welligen Faser (im spannungsoptischen Modell ein Roving) auf eine nachgiebige Matrix und der Untersuchung des Einflusses des Welligkeitsverhältnisses ist das Zusammenspiel mehrerer Fasern von Interesse. In einem FKV kommt nie eine einzelne Faser zum Einsatz. Im mikroskopischen Bereich sind tausende Filamente parallel in die Matrix eingebettet und im Makro-Bereich sind hunderte Fäden verwoben oder im Gelege angeordnet. Die Interaktion gleichphasig nebeneinander angeordneter Fasern wurde hier nicht untersucht, da die benachbarten Fasern die gleichen Verformungen in die gleiche Richtung erfahren. Die auftretenden Schubspannungen wurden während der spannungsoptischen Versuche nicht berücksichtigt.

In Abbildung 58 ist Probe SO-6 abgebildet, welche die Interaktion zweier phasenversetzter welliger Fasern deutlich macht. Schon bei einer kleinen Last von 20 N sind deutliche Farbmuster zu erkennen. An den Extrempunkten beider Fasern bilden sich dunkle Punkte aus. An den Kreuzungen der beiden Rovings entstehen rote Bereiche, welche sich bei steigender Belastung weiter ausprägen und verfärben. Diese Bereiche, beispielhaft bei 136 N rot gekennzeichnet, sind Zugspannungsbereiche, da sich die gewellten Rovings hier auseinander bewegen. Im Gegensatz dazu sind die Bereiche zwischen den gegenüberliegenden Extrempunkten der beiden Rovings sowohl durch Zugspannungen in X-Richtung als auch durch Druckspannungen in Y-Richtung belastet, gekennzeichnet mit Rot bei 217 N. In diesen Bereichen kommt es durch die auftretenden Druck-

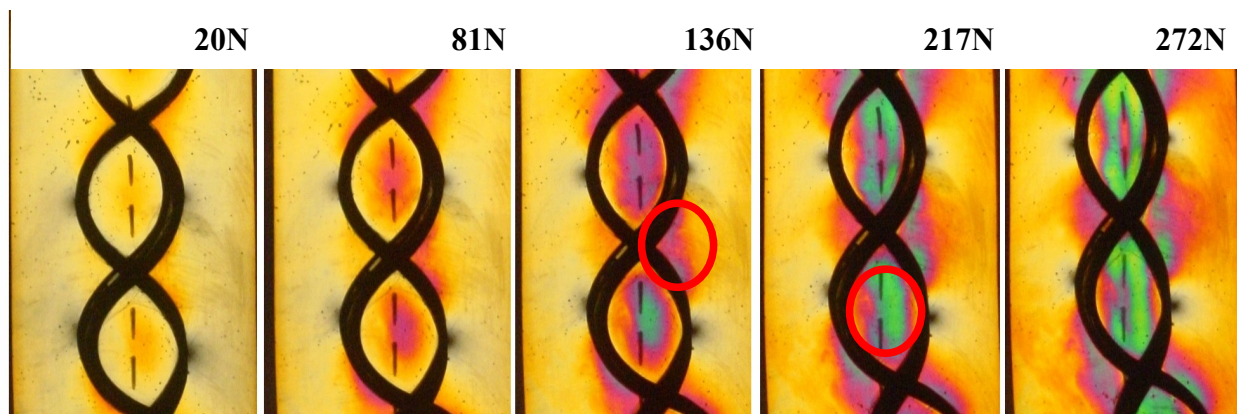


Abbildung 58: Dunkelfeldaufnahme bei steigender Belastung, SO-6

spannungen zum lokalen Beulen in Z-Richtung. Die lang gestreckten Beulen beschränkten sich auf den Bereich zwischen den Rovings und bildeten sich unkontrolliert in positive und negative Z-Richtung.

Den Versuch, die Faserwelligkeit in einem vereinfachten Modell nachzubilden, stellt die Probe SO-9 dar. In Abbildung 59 ist die spannungsoptische Dunkelfeldaufnahme zu sehen. Deutlich ist das Metallgelenk zu erkennen, was eine halbe Wellenlänge darstellt. Im unbelasteten Zustand sind vor allem im Bereich der Umlenkpunkte und im Öffnungsbereich des Mechanismus Eigenspannungen zu erkennen. Bei steigender Zugkraft bilden sich im Bereich zwischen den Gelenkschenkeln Spannungsfelder, deren Einfluss sich bei steigender Last bis zum Rand ausdehnt. Hier überlagern sich Druck- und Zugspannungen, welche aus den Dehnungen durch die Öffnung des Gelenkes und den Steifigkeiten der Matrix hervorgehen. Die wirkenden Kraftvektoren F und die Steifigkeiten c_1 , c_2 und c_3 sind in Abbildung 60 dargestellt. Durch die Zugkraft F vergrößert sich b im Steifigkeitsdreieck, wobei die Schenkellänge h konstant bleibt und sich die Amplitude a verringert. Dieser Bewegung wirken die Matrixsteifigkeiten entgegen, was Spannungen in der Matrix bedingt.

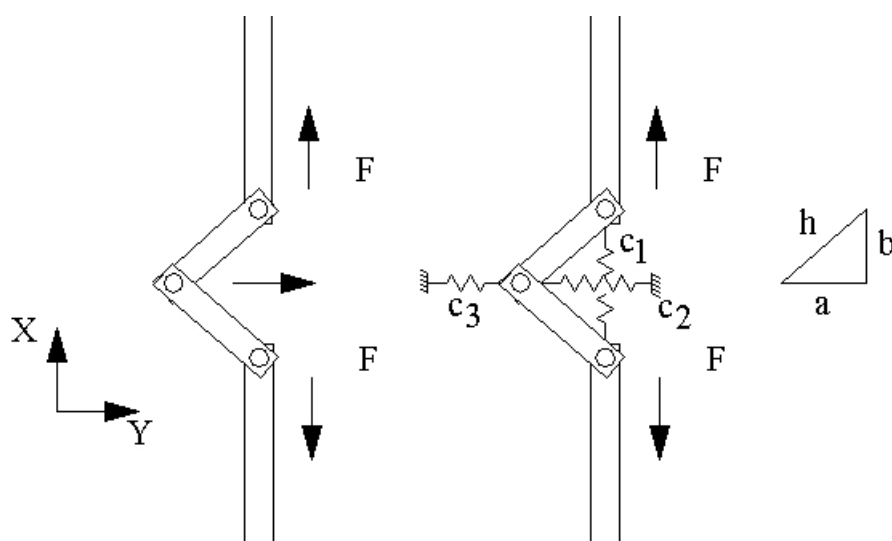


Abbildung 60: Analytische Betrachtung des Gelenk-Modells

Da sich zwar alle drei Steifigkeiten c_1 , c_2 und c_3 auf dasselbe Material (Polyurethan) beziehen, sind sie gleichgroß, unterscheiden sich aber, ob Zug- oder Druckspannungen in der jeweiligen

Richtung vorliegen. So werden PUR als inkompressibel angesehen, was zu den Beulen in Druckrichtung führt. Bei der Betrachtung der Gelenkgeometrie und dem Zusammenspiel der Kathetenlängen ergibt sich bei einer konstanten Hypotenuse das in Abbildung 61 abgebildete nichtlineare Verhältnis von Längen- und Amplitudenänderung. Je stärker das Gelenk geöffnet wird, um so schneller verkleinert sich die Amplitude des Extrempunktes. In Bezug auf die N-FKV bestätigt sich das progressive Werkstoffverhalten, da bei fortschreitender Streckung der Fasern die Amplitude stärker abnimmt und damit die Spannungen zunehmen.

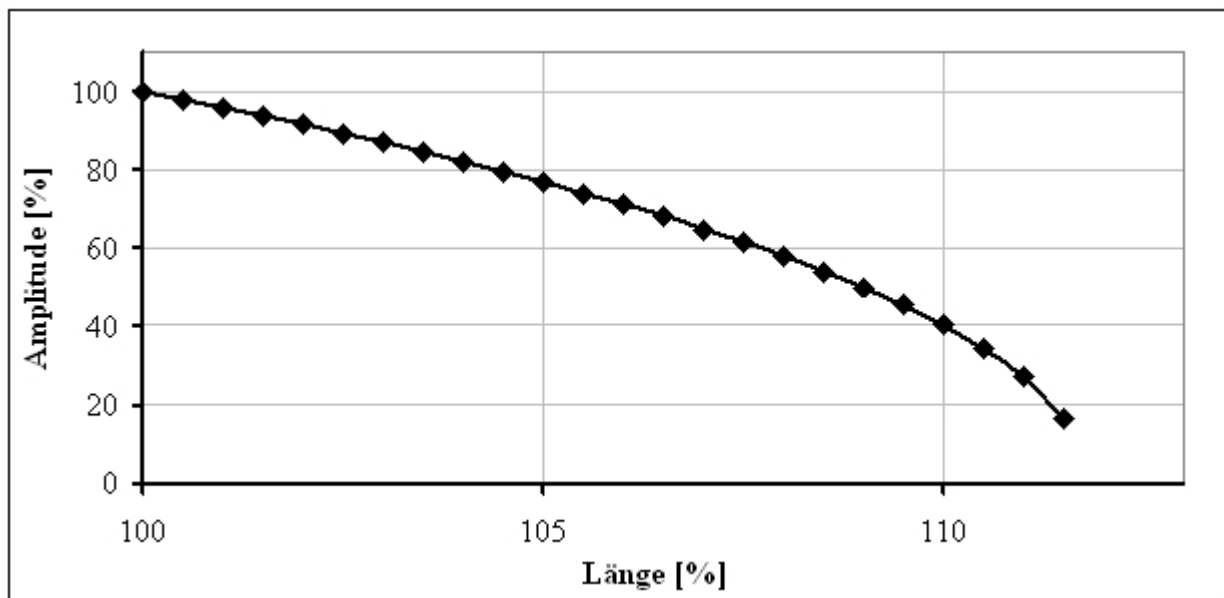


Abbildung 61: Zusammenhang zwischen Längenänderung und Amplitude am Gelenk

Die Festigkeitsproben zur Untersuchung des Einflusses des Welligkeitsverhältnisses zeigten einheitliche Versagensbilder und bestätigten die Schwachstellen der spannungsoptischen Proben an den Wendepunkten. Daneben wurden die Spannungsspitzen an den Übergängen vom geraden zum gewellten Bereich sichtbar. Die Interaktion phasenversetzter benachbarter Fasern zeigte ein gehobenes Spannungsniveau und machte mögliche Schadensstellen an den Kreuzungen der Fasern deutlich. Außerdem wurden die Druckzonen zwischen den Faserauslenkungen offensichtlich. Das Gelenk ermöglichte genaue Einblicke in das Streckungsverhalten einer ausgelenkten steifen Verstärkung in einer nachgiebigen Matrix. Die modellhafte Abbildung einer ausgelenkten Faser zeigte in den spannungsoptischen Aufnahmen die unbelasteten Zonen um die gestreckte Verstärkung und die Belastungsspitzen an den Extrempunkten. Außerdem konnte der nichtlineare Zusammenhang zwischen Längen- und Amplitudenänderung sichtbar gemacht werden.

3.5.2 Finite-Element-Analysen

Die Finite-Element-Analyse stellt für Strukturuntersuchungen und zur Lösung von Entwicklungsaufgaben mit hohen Anforderungen an Gewichtsersparnis und Spannungsoptimierung ein unentbehrliches Mittel dar. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Berechnungssoftware „ABAQUS 6.6“ zur numerischen Simulation von N-FKV-Proben verwendet, wobei die Art und Geometrie der FEA-Modelle an die spannungsoptischen Proben angelehnt ist. Für das prinzipiell-

le Verständnis und für die Demonstration der Machbarkeit einer FEA an N-FKV wurden signifikante spannungsoptische Modelle ausgewählt. Die einfach wellig verstärkte Faserprobe (SO-3) und die phasenversetzt verstärkte Faserprobe (SO-6) wurden als FEA Modell nachgebildet.

Für die Geometriemodellierung, die Netzgenerierung und das Anbringen der Randbedingungen und Lasten wurde als Preprozessor die Software „Hypermesh“ verwendet. Ausgehend von den spannungsoptischen Proben wurde eine flache Rechteckgeometrie erzeugt. Es wurden folgende Maße verwendet: 240 mm x 40 mm x 2 mm. Zur Simulation der Einspannungen und der Zugbelastung wurden die beiden Enden der Probe auf 45 mm Länge als starr definiert und die Proben weggesteuert belastet. Von der kraftgesteuerten Belastung wurde bei der FEA abgesehen, da durch diese bei hyperelastischen und nicht bekannten Materialeigenschaften das Risiko der Nichtkonvergenz eingegangen wird. Zwar könnte das Kraftinkrement sehr klein gewählt werden, aber es würde den Rechnungslauf verlangsamen.

Die gewellte Form der Fasern wurde über die Sinusfunktion (mit den Amplituden und den Perioden der spannungsoptischen Proben) definiert und bildet so die geometrische Grundlage für die Modellierung der Verstärkung. Die getränkten Fasern wurden als Rebar-Layer abgebildet, welches eine Funktion von Abaqus zur Simulation von FKV darstellt. Mit Rebar können in Membran, Shell und Surface Elementen unidirektionale Verstärkungsschichten eingebracht werden. Diese Schichten definieren sich über die Werkstoffeigenschaften, den Querschnitt und die Lage der Schicht im Element. Für die Simulation der spannungsoptischen Probe SO-3 wurden drei Modelle mit unterschiedlichen Elementtypen (siehe Tabelle 19) erstellt.

Tabelle 19: Verwendete Elementtypen in Abaqus

| Name | Knoten | Elementtyp | Besonderheiten |
|-------|--------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| S4R | 4 | shell | Allzweck Schalen-Element, eine Dimension kleiner als M3D8 und C3D20 |
| M3D8 | 8 | membran | Dreidimensionales Membran-Element ohne Biegesteifigkeit und geeignet für Faserverstärkungen |
| C3D20 | 20 | solid | Quaderförmiges Kontinuum-Element für inkompressible und hyperelastische Materialien |

Im Schalenmodell wurden sowohl Matrix als auch Fasern mit Schalenelementen und Koppelbedingungen abgebildet. Die Fasern sind hier als elastische Verstärkungen in den jeweiligen shell Elementen abgebildet. Der Querschnitt der Verstärkung beträgt 4 mm² und beinhaltet 2400 Filamente. Im Membran- und im Solidmodell wurden die Fasern in Form eingebetteter Membranelemente modelliert.

Das hyperelastische Werkstoffmodell für die PUR-Matrix basiert auf den experimentell gewonnenen Matriceigenschaften der unverstärkten Matrix, siehe Abbildung 41. Für die Verstärkungsfasern wurde ein elastisches Materialmodell angenommen, wobei die Werte für die imprägnierten Kohlenstofffasern der Literatur entstammen [Mos92]. Dabei wurden die Fasereigenschaften in Form der Sinuskurve zugewiesen.

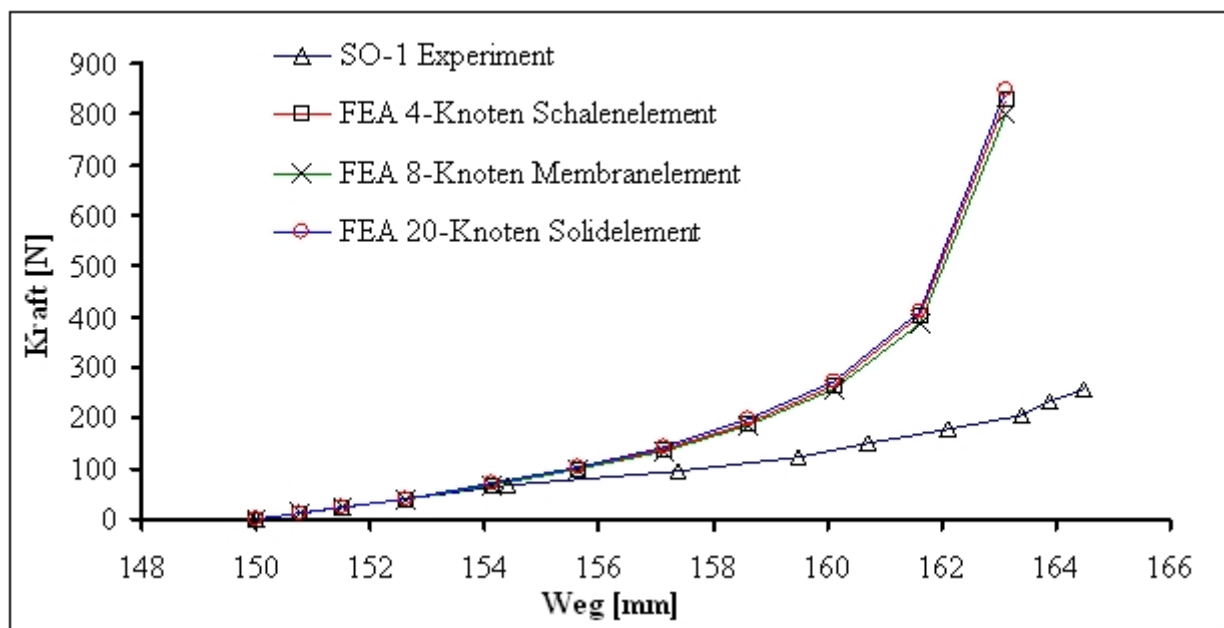


Abbildung 62: Kraft-Weg-Verläufe der verschiedenen Elementtypen

Es wurden zwei Vergleiche gerechnet, zum einen wurden die verschiedenen Elementtypen mit den experimentellen Ergebnissen verglichen und zum andern wurden verschiedene Werkstoffmodelle untersucht. In Abbildung 62 sind die Kraft-Weg-Kurven für die verschiedenen Elementtypen zu sehen. Hier wurde das Marlow-Modell als Werkstoffmodell für die PUR-Matrix herangezogen, da diesem Werkstoffmodell eine gegebene Kraft-Weg-Kurve zu Grunde gelegt werden kann. Bei allen drei Kurven ist deutlich das Abweichen der Berechnungen von den experimentellen Werten bei größeren Verformungen zu erkennen. Die Berechnungsergebnisse unterscheiden sich nur geringfügig, was einen kleinen Einfluss des Elementtyps auf das Berechnungsergebnis nahe legt. Um den Einfluss des Materialmodells auf die Berechnungsergebnisse nachweisen zu können, wurde das Schalenmodell von SO-3 mit den in Tabelle 20 erläuterten Modellen für die PUR-Matrix simuliert.

Tabelle 20: Beschreibung der verwendeten Materialmodelle, [ABA06]

| Modell | Beschreibung |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Neo-Hooke | <ul style="list-style-type: none"> Physikalische Interpretation, bildet Elastomere basierend auf wenigen Testdaten ab |
| Mooney-Rivlin | <ul style="list-style-type: none"> Allgemeines hyperelastisches Modell mit eingeschränkter Genauigkeit |
| Arruda-Boyce | <ul style="list-style-type: none"> Physikalische Interpretation, gute Genauigkeit bei wenig Testdaten |
| Van der Waals | <ul style="list-style-type: none"> Physikalische Interpretation, bildet Schubbelastungen in elastomeren Materialien gut ab |
| Marlow | <ul style="list-style-type: none"> Physikalische Interpretation, genaue Abbildung kleiner Verformungen in elastomeren Materialien |

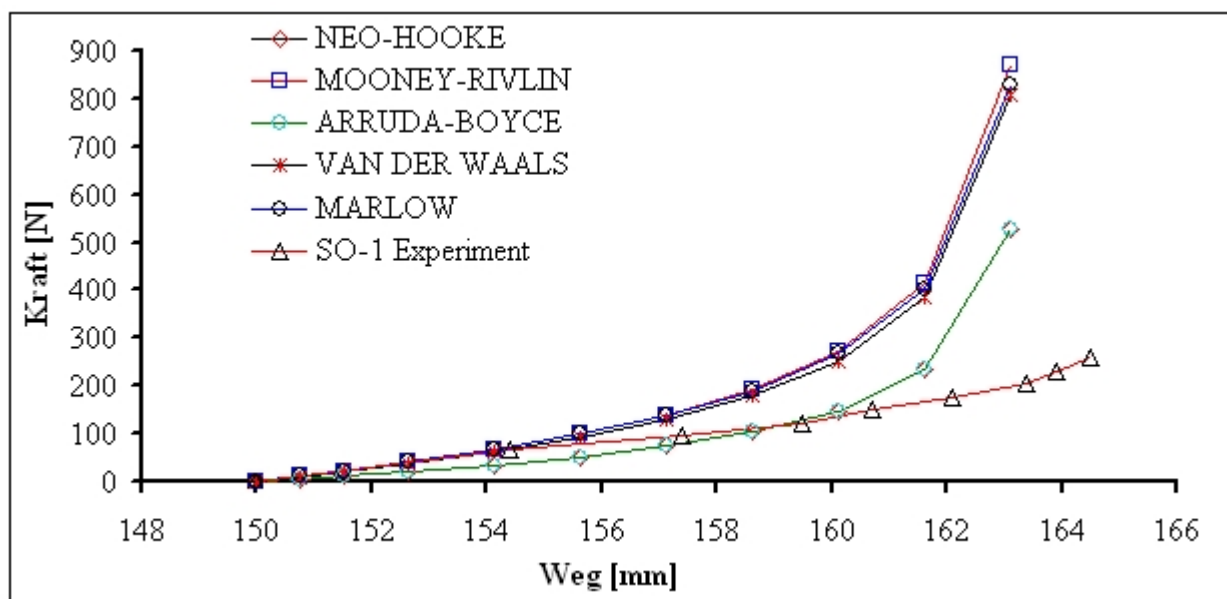


Abbildung 63: Kraft-Weg-Verläufe der verschiedenen Werkstoffmodelle

In Abbildung 63 sind die Kraft-Weg-Verläufe zu sehen. Wieder wachsen die Abweichungen zwischen dem Experiment und den Berechnungen bei steigender Belastung an. Dabei fallen die Werkstoffmodelle nach Neo-Hooke und Arruda-Boyce durch eine bessere Näherung der experimentellen Daten auf. Diese beiden Ansätze werden benutzt, wenn experimentelle Daten nur für eine Dehnungsrichtung vorliegen. Die Werkstoffmodelle nach Mooney-Rivlin, van der Waals und Marlow bilden die experimentellen Werkstoffdaten mit einer physikalischen Interpretation genauer ab, siehe [ABA06]. Generell muss gesagt werden, dass für alle Werkstoffmodelle möglichst viele experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden sollten und die Werkstoffeigenschaften in mehreren Lastfällen zu erfassen sind.

In Abbildung 64 sind für die spannungsoptischen Proben SO-3 und SO-6 die relativen 1. Hauptspannungen dargestellt, wobei die quantitative Angaben bedingt durch ungenügende Werkstoffdaten nicht ausgewertet wurden. Deutlich sind am Modell der Probe SO-3 die Nullpunkte der 1.

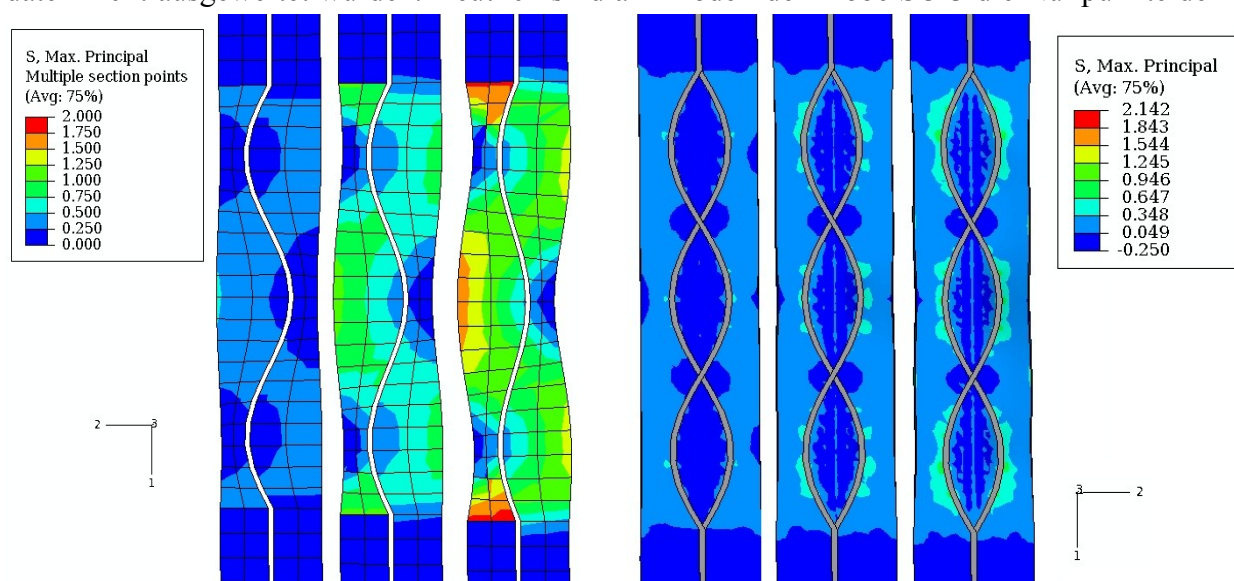


Abbildung 64: Qualitative relative 1. Hauptspannungsverteilung in SO-3 und SO-6

Hauptspannung an den Extrempunkten zu erkennen. Des weiteren fallen die Spannungsspitzen an den Übergängen zwischen welligem und geradem Faserbereich auf. Durch die Belastung wird die Faserwelligkeit reduziert und die Probe verformt sich. Im Modell der Probe SO-6 heben die phasenversetzten Fasern die Bewegungen der Matrix auf. Die modellierte Struktur bleibt quasi gerade, aber in den Druckzonen zwischen den Fasern entstehen Beulen senkrecht zur Probenoberfläche. Außerdem sind Spannungsüberhöhungen an den Faserkreuzungen und in der näheren Umgebung der Extrempunkte zu sehen.

3.6 Andere nicht geradlinige flächige Faserverstärkungen in N-FKV

Neben den wellig verstärkten N-FKV wurden auch andere nicht geradlinig verlaufende Faserverstärkungen in Kombination mit einer PUR-Matrix untersucht. Dazu wurde eine Probenreihe (5PU) mit einer 45° zur Belastungsrichtung orientierten Glasleinwandgewebe Verstärkung mit einem Flächengewicht von 600 g/m² hergestellt. Als zweite flächige nicht geradlinig verstärkte Probenreihe wurden durch drei Lagen Wirrfasermatte, Flächengewicht 225 g/m², verstärkte PUR-Proben (17PU) untersucht. Die Werkstoffkennwerte wurden in Zugversuchen, angelehnt an die DIN EN ISO 527, bestimmt. Zum Einsatz kam eine servohydraulische Prüfmaschine MTS 322.21 mit einem Messbereich von 100 KN und einem Fehler von +/- 15 N. Entsprechend EN ISO 527-5 für verstärkte Kunststoffproben waren die Abmaße der Proben beider Versuchsreihen 250 mm x 2 mm x 25 mm. Die Probenreihen wurden jeweils als eine Platte mit je fünf Proben im Gießverfahren handlaminieren. Die Proben wurden aus den Platten mittels Cutter-Messer geschnitten.

Als Matrix kam in beiden Probenreihen die Polyurethan Matrix PPT80A [APC04] zum Einsatz und es gab in beiden Reihen keine durchgehenden in Belastungsrichtung verlaufenden Fasern. In Reihe 5PU waren durch das verdrehte Ablegen der Glasgewebeverstärkung alle Fasern + 45° bzw. - 45° zur Lasttrichtung angeordnet und in Reihe 17PU waren die Fasern nicht länger als 50 mm. Die Ergebnisse der Zugversuche sind in Tabelle 21 und in Abbildung 65 als Durchschnittswerte im Vergleich zur wellig verstärkten N-FKV Reihe 20PU zusammengefasst. Die Gewebeverstärkung der Reihe 5PU wurde bei steigender Belastung stark gedehnt und die Fasern verdrehten sich zu einander. Die ursprüngliche Orthogonalität des Leinwandgewebes wurde aufgehoben. Die beobachtete starke Verdrehung der sich kreuzenden Fasern zueinander ist in ähnlicher Form durch *Koschmieder* [Kos00] in Bezug auf flexible Flechtschläuche beschrieben. Dabei ist eine Verdrehung ohne Werkstoffschädigung nur bis zu einem Maximalwinkel von 55° möglich. Wird dieser erreicht, kommt es zum Schubversagen der Matrix und zur Delamination zwischen Faser und Matrix. Die Probenreihe 5 PU versagte nach einer starken Verdrehung der ursprünglich orthogonalen Gewebefäden zueinander. Dabei konnte der Verdrehwinkel nicht gemessen werden, da berührungslose Messverfahren aus Sicherheitsgründen dafür nötig sind, aber nicht zur Verfügung standen. Die Proben färbten sich weiß (Delamination) und es traten Matrixrisse an den Faserkreuzungen auf. Der Spannungs-Dehnungs-Verlauf ähnelt dem der unverstärkten Matrix bis zu dem Punkt an dem Fasern aus der Matrix ausreißen.

Tabelle 21: Gemittelte mechanische Kennwerte der Zugprüfungen an den Reihen 5PU, 17PU und 20PU

| | 5PU, 45° 600g/m ² Gewebe | 17PU, 225g/m ² Wirrfasermatte | N-FKV 20PU 65x6 600g/m ² Gewebe |
|----------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Halbzeug | Glasgewebe 600 g/m ² | 3fach Glasfasermatte 225 g/m ² | Glasgewebe 600 g/m ² |
| E-Modul (GPa) | 0,16 | 3,3 | 0,7 – 4,5 |
| Zugfestigkeit (MPa) | 15,4 | 88,5 | 190 |
| Bruchdehnung % | 19 | 3 | 9,1 |

Die Probenreihe 17PU ist wesentlich steifer als Reihe 5PU und hat eine viel höhere Festigkeit. Die Proben waren aus drei Lagen (eine Lage war zu dünn und zu schwach zum Testen) aufgebaut und es gab in den stochastisch orientierten Fasern somit auch Fasern in Belastungsrichtung. Diese bis zu 50 mm langen Fasern verstärkten den Verbund besser als das um 45° verdrehte Gewebe. Das Versagen der Proben war abrupt und es kam zu Faserausrissen. Einzelne Delaminationen in Form weißer Striche waren zu beobachten. Im Vergleich zur Probenreihe 20PU ist das Fehlen des J-förmigen Spannungs-Dehnungs-Verlaufes in Abbildung 65 klar zu erkennen.

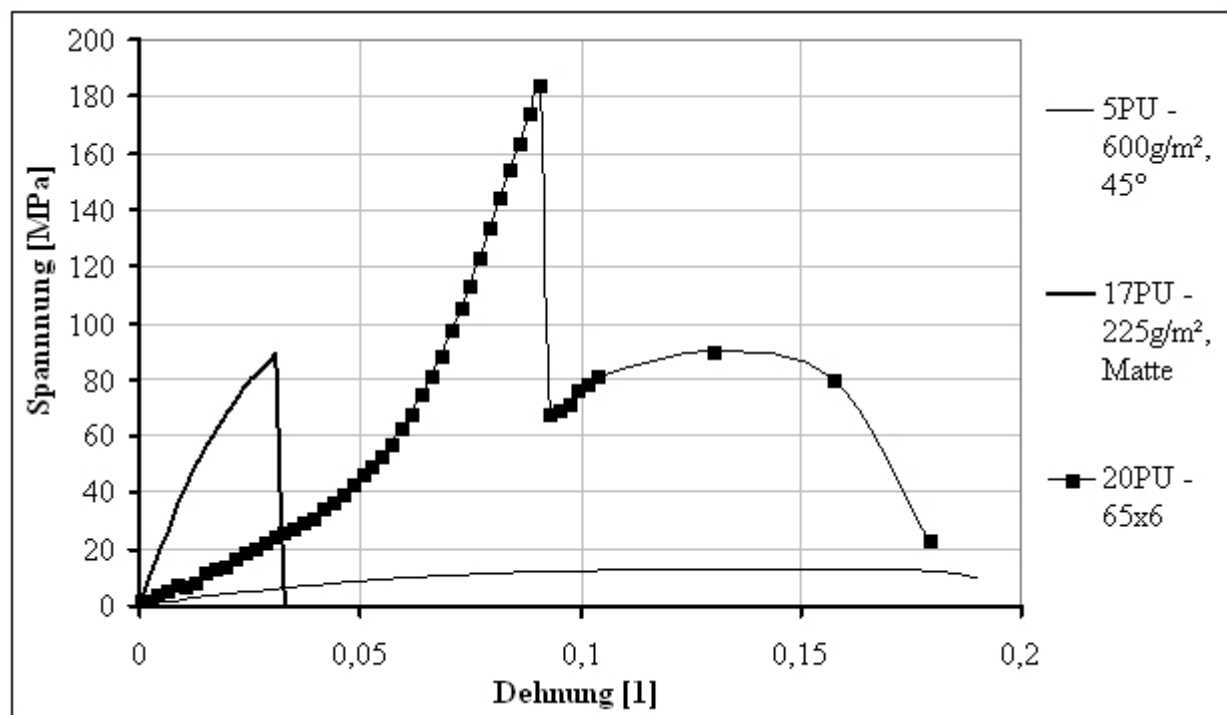


Abbildung 65: Signifikante Spannungs-Dehnungs-Kurven der Reihen 5PU, 17PU und 20PU

Es ist deutlich, dass die hier untersuchten Verstärkungen weder in Bezug auf die Steifigkeit noch in Bezug auf die mechanische Belastbarkeit Alternativen zu den N-FKV darstellen, vergleiche Tabelle 21.

3.7 Diskussion der Untersuchungen von flächigen N-FKV

Wie die Zugversuche an verschiedenen flächigen nicht geradlinig verstärkten FKV gezeigt haben, steckt ein großes Potential in den N-FKV. Durch die Kombination von nachgiebiger Matrix und welliger Faser können große Dehnungen und hohe Festigkeiten miteinander kombiniert werden. In den Versuchen konnte nachgewiesen werden, dass die maximalen Dehnungen in der direkten Abhängigkeit zum Amplituden-Perioden Verhältnis stehen. In Abbildung 66 sind die Welligkeitsverhältnisse über Bruchdehnungen der in Tabelle 22 gelisteten Probenreihen aufgetragen. Die zugrunde liegenden Daten sind in den Tabellen 11, 12 und 13 zu finden. Eine mögliche lineare Trendlinie wird hier durch

$$\frac{a}{\lambda} = 0,00065 \epsilon + 0,0296 \quad (3.5)$$

beschrieben.

Tabelle 22: Welligkeitsverhältnisse und Bruchdehnungen von flächigen N-FKV Probenreihen

| | 6PU | 26PU | 12PU | 27PU | 24PU | 21PU | 3PU | 11PU | 20PU | 25PU | 22PU |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ϵ [%] | 2,4 | 4,5 | 5 | 5,9 | 6,3 | 7,5 | 7,7 | 7,8 | 9,1 | 14,8 | 17,1 |
| a/λ | 0,028 | 0,067 | 0,057 | 0,077 | 0,076 | 0,079 | 0,083 | 0,079 | 0,092 | 0,125 | 0,135 |

Die mit dem Ansatz der Sinusfunktion berechneten Dehnungen beschreiben das experimentell festgestellte Werkstoffverhalten sehr gut, wenn man eine Korrekturdehnung von ca. 1,5 % berücksichtigt. Diese ist in der Reststreckung von Fasern (vor allem beim Gewebe), im Setzen der

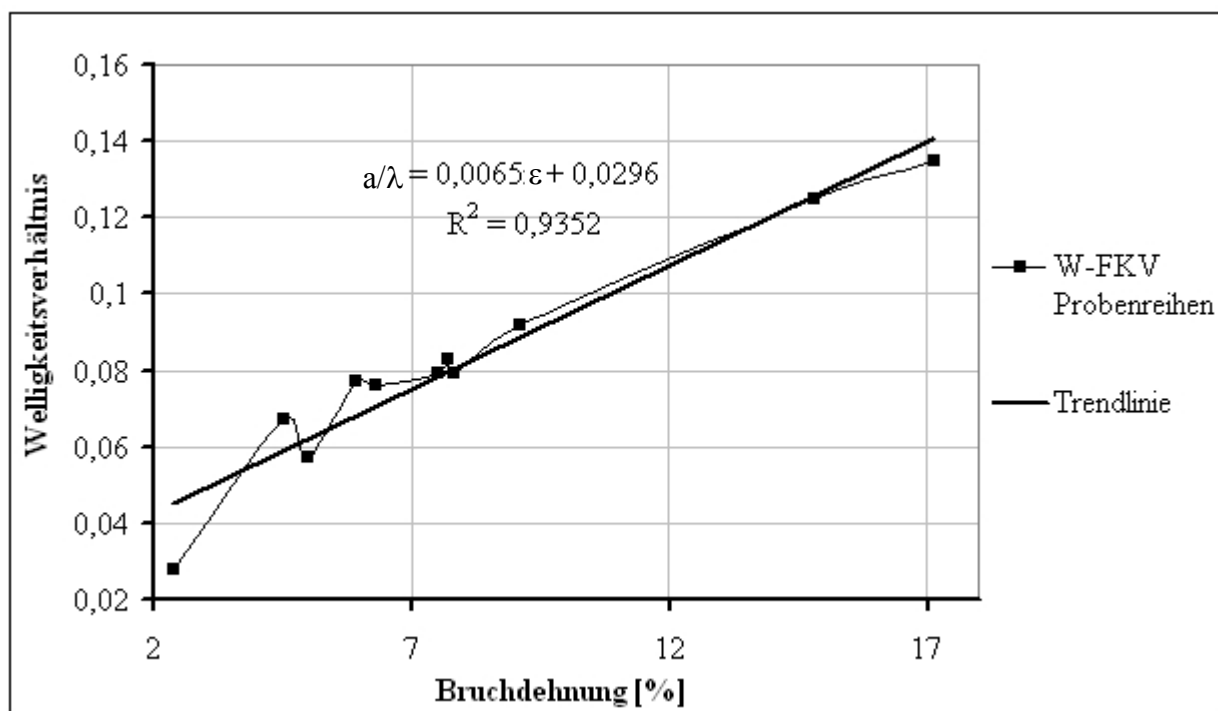


Abbildung 66: Zusammenhang von Welligkeitsverhältnis und Bruchdehnung flächiger N-FKV

Einspannungen und in Messfehlern begründet. Der vorgestellte Schwenk-Verzerr Fertigungsmechanismus hat sich prinzipiell bewährt und kann skaliert in industrielle Fertigungsstrecken für Halbzeuge integriert werden. Die positiven Eigenschaften und Ergebnisse sind folgend zusammengefasst.

- Wellige Faserhalbzeuge können mit einer nachgiebigen Polyurethan Matrix kombiniert werden.
- Es können Gewebe, Gelege und Prepregs wellig verformt werden.
- Faserwelligkeit wurde reproduzierbar mit definierten Welligkeitsverhältnissen hergestellt.
- Die mechanischen Eigenschaften stehen im direkten Zusammenhang mit dem Welligkeitsverhältnis und dem gewählten Faserhalbzeug.
- Es gibt einen linearen Zusammenhang zwischen Welligkeitsverhältnis und Bruchdehnung.
- Es wurden bei N-FKV (23PU) Bruchdehnungen von 21 % bei einer Zugfestigkeit von 195 MPa, was 58 % der Festigkeit eines vergleichbaren steifen FKV (UP-1, 342 MPa) entspricht, nachgewiesen.
- Die maximale Dehnung eines N-FKV lässt sich analytisch berechnen, wobei ein systematischer Fehler von ca. 1,5 % zu beachten ist.
- Prinzipbedingte Verwölbungen von flachen Zuelementen aus N-FKV lassen sich durch Ausschneiden verhindern.
- Es konnten gezielt Werkstoffeigenschaften erzeugt werden, die denen von natürlichen Sehnen ähneln.

Neben diesen positiven Ergebnissen wurden auch folgende Nachteile mit Entwicklungspotential festgestellt:

- Die Versuche zeigten, dass die Tränkung der Faserhalbzeuge, vor allem der schweren, durch die hohe Viskosität der Polyurethan-Matrix schwierig ist.
- Die Konstanz der gefertigten Welligkeitsverhältnisse hängt sehr vom Geschick des Werkers ab. Eine Automatisierung könnte Abhilfe schaffen.
- Die Krafteinleitung in N-FKV, im Speziellen in flache Zugproben, ist schwierig, da die Matrix sich stark einschnürt und zu große Klemmkräfte Versagen in der Einspannung unterstützen. N-FKV müssen einen geraden Faserbereich zur Krafteinleitung haben. Künftige Krafteinleitungselemente könnten sich an der Verbindung von Muskel und Sehne orientieren.
- Bei dynamischer und langer statischer Belastung kommt es zum Kriechen bzw. zur Relaxation. Dieses Verhalten ist in der Matrix und dem Versagen der Faser-Matrix-Bindung begründet.
- Das dynamische Werkstoffverhalten ist bei Gewebefaserverstärkungen durch die hohen Schubbeanspruchungen schlecht. Eventuell können Gelege hier eine Verbesserung darstellen, da diese keine Faserkreuzungen haben.

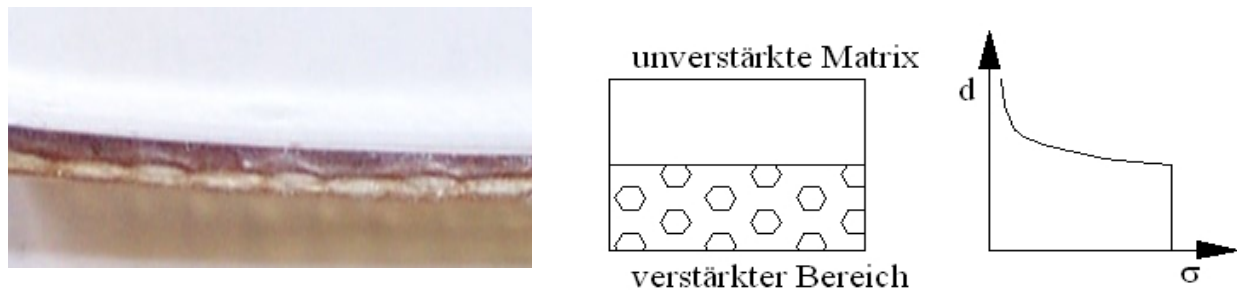


Abbildung 67: Spannungen über die Dicke bei ungleichmäßig verstärkter PU-Probe

Bei der Auswertung aller Proben wurde sich immer auf den faserverstärkten Bereich des Probenquerschnitts (deutlich sichtbar im Querschnitt und wurde daher ausgemessen) der Zugproben bezogen, da die unverstärkten Bereiche bei nachgiebigen Matrices nur eine kleine Steifigkeit besitzen und daher kaum belastet sind, siehe Abbildung 67. Die ungleichmäßige Verteilung der Verstärkungskomponenten basiert auf dem Fertigungsverfahren. Um die flächigen Verstärkungsfaserhalbzeuge verzerren zu können, mussten diese zuerst in einer ebenen Form getränkt werden. Dann wurde verzerrt und weiter getränkt. Während der Aushärtungsphase sanken die Fasern innerhalb der noch nachgiebigen Matrix auf den Boden der Form und es bildete sich oben eine reine Matrixschicht. Da die Steifigkeit dieser Matrixschicht aber im Vergleich zum verstärkten Bereich vernachlässigbar klein ist, hatte sie auf die Auswertung keinen Einfluss.

Elastizitätsmodul der künstlichen Sehne

Für alle welligverstärkten Proben wurden die Sehnen-Steifigkeitsmodule E_s und die Sehnenkonstante n nach Gleichung (2.4) ermittelt. Hierzu wurden grafisch mittels der Software MS-Excel best-fit Kurven erzeugt, um die beiden jeweiligen Variablen für jede Versuchsreihe zu erhalten. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 11 und Tabelle 12 zusammen gefasst und Abbildung 68 verdeutlicht das Näherungsverfahren. Als Zielbereiche geben Klute *et al.* [KCH00] für die Achillessehne Folgendes vor:

$$5773 \text{ MPa} \leq E_s \leq 27614 \text{ MPa} \quad (\text{nach 2.5})$$

$$n \approx 2$$

Bei den Gewebereihen 12PU, 25 PU und 26PU ist die Näherung sehr ungenau, da der Steifigkeitsunterschied zwischen den beiden Tangenten E-Modulen sehr ausgeprägt ist.

Prinzipiell lässt sich das Sehnenverhalten durch alle Gewebereihen abbilden, wobei die Näherung unterschiedlich gut ist. Die Gelegereihen lassen sich zwar auch mit Gleichung (2.4) abbilden, aber die Werte für E_s und n liegen nicht im vorgegebenen Bereich. Wie in Tabelle 12 zu sehen, verfehlen besonders die Werte für E_s den Zielbereich um den Faktor zehn.

| | | |
|--------------------------------|------------|------------------|
| 11PU: $E_s = 27,7 \text{ GPa}$ | $n = 1,87$ | schlechter „fit“ |
| 20PU: $E_s = 20 \text{ GPa}$ | $n = 2$ | guter „fit“ |

In Bezug auf die Eignung von N-FKV zur Herstellung künstlicher Sehnen muss dagegen der Faservolumenanteil kritisch betrachtet werden. Vor allem N-FKV mit einer welligen 600 g/m²

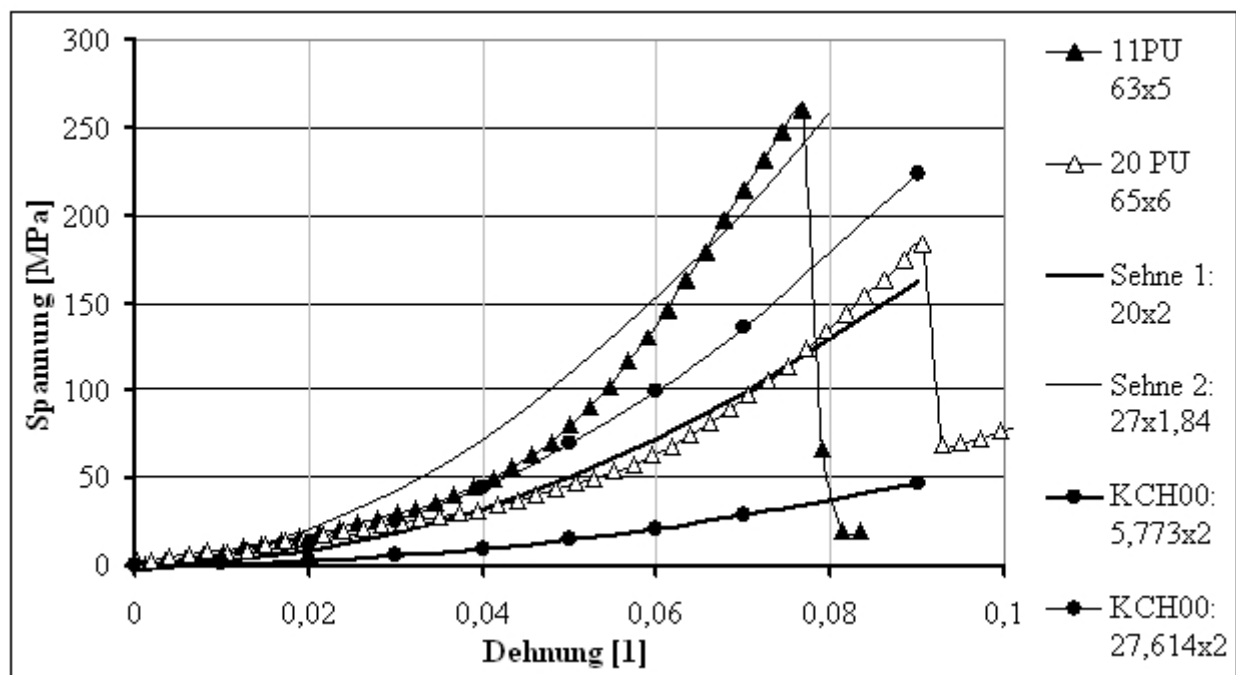


Abbildung 68: Ausgewählte N-FKV mit entsprechenden Sehnen-Näherungen

Glasgewebeverstärkung zeigten in den Zugversuchen das sehnentypische J-förmige Spannungs-Dehnungs-Verhalten. Die Probenreihe 20 PU mit einem Welligkeitsverhältnis von 0,092 und einer Bruchdehnung von 9,1 % hat ausgehend vom gemessenen Probenquerschnitt einen Faservolumenanteil von 0,18. Bezogen auf diesen Querschnitt liegen auch die Steifigkeiten mit Tangenten E-Modul von 385 MPa bis 2475 MPa im Bereich von natürlichen Sehnen. Zieht man dagegen zur Berechnung der Querschnittsfläche nur die Bereiche mit Verstärkungsfasern heran, da nur diese Bereiche beansprucht werden, ist der Faservolumenanteil mit 0,33 wesentlich höher. Daraus ergeben sich größere Spannungen und damit Steifigkeiten. Bei einem möglichen Einsatz eines N-FKV als künstliche Sehne ist der Werkstoff sicher mit einer Schicht reiner Matrix ummantelt, was den Faservolumenanteil der künstlichen Sehne senkt.

Zur Abbildung des natürlichen Verhaltens der Achillessehne und zur Herstellung künstlicher Sehnen sind flächige sinusförmig gewebeverstärkte PUR als N-FKV gut geeignet. Durch die mögliche Anpassung des Welligkeitsverhältnisses sind verschiedene Sehnencharakteristiken herstellbar.

Spannungsoptische und Finite-Element-Analysen

Die spannungsoptischen Analysen bieten wichtige Ergebnisse und einzigartige Einblicke in das Innere einer Materialprobe. Vor allem bei der Untersuchung von Verbundwerkstoffen mit nachgiebiger Matrix und großen Dehnungen liefert die Spannungsoptik relativ einfach und schnell flächige Aufnahmen der Faser-Matrix Interaktion. Soweit die Methoden und Werkzeuge der FEA auch schon entwickelt sind, bei Verbundwerkstoffen mit anisotropen Materialeigenschaften

ten, großen nicht linearen Dehnungen und kaum bekannten Werkstoffeigenschaften stoßen sie schnell an ihre Grenzen. Zwar sind auch mit Vereinfachungen Ergebnisse lieferbar, aber wie fundiert diese sind, ist nur durch Experimente validierbar.

Da in dieser Arbeit ein Großteil der Proben mit einer PUR-Matrix hergestellt wurde, konnte die spannungsoptische Eigenschaft des Werkstoffs genutzt werden. Es wurden zahlreiche spannungsoptische Proben mit einzelnen Rovings gefertigt und getestet. Schon bei der Fertigung traten Probleme und Fragen auf, welche die Ergebnisse anschließend beeinflussten. So kam es zum Zurückstrecken der Rovings, es wurden beim Aushärten Luftblasen eingeschlossen, die Probenstärke war nicht konstant und die gewellten Fasern schwammen auf. Während der Versuche wurde festgestellt, dass nur ein sehr kleiner Dehnungsbereich abgedeckt werden kann (ca. 40% statt 600%) und dass daher die auftretenden Spannungen sehr klein waren. Um spannungsoptische Aufnahmen sinnvoll quantitativ auswerten zu können, müssen mehrere Ordnungen beim Belasten durchlaufen werden. Dies war, bedingt durch die für PUR relativ kleinen Dehnungen, nicht der Fall. Trotzdem konnten Stellen von Wichtigkeit für das Verständnis der Interaktion zwischen welliger Faser und nachgiebiger Matrix gefunden werden.

Die vorgestellten Finite-Element-Analysen stellen verschiedene Möglichkeiten der Simulation der spannungsoptischen Versuche SO-3 und SO-6 dar. So wurden mehrere Elementtypen und Werkstoffmodelle miteinander verglichen. Als Werkstoffeigenschaften wurden die im Zugversuch ermittelten Kraft-Weg-Daten für die PUR Matrix herangezogen. Die Fasern wurden basierend auf Hersteller- [Tor06] und Literaturangaben für Kohlenstofffasern [Mos92] definiert. Für die Abweichungen der Berechnungen von den experimentellen Ergebnissen können mehrere Rahmenbedingungen verantwortlich sein. Auf Seiten der Experimente steht als erstes die mangelnde statistische Absicherung, da nur eine Probe SO-3 getestet wurde. Bei diesem Versuch wurden nur wenige Daten nicht kontinuierlich aufgenommen. In den kurzen manuellen Messpausen kam es zum geringfügigen Kriechen der Probe. Außerdem wurde die bis 600 % dehnbare Probe nur um maximal 40 % gedehnt. Weitere experimentelle Unregelmäßigkeiten entstanden durch den Aufbau und die Fertigung der Probe. In Bezug auf die Simulation sind die wenigen Materialdaten kritisch zu betrachten. Da diese statistisch nicht belastbar sind, kann auch die FEA angefochten werden. Die in Abbildung 64 dargestellten graphischen Ergebnisse der Finiten-Element-Analysen zeigen die qualitative Spannungsverteilung in Belastungsrichtung der Probe. Der direkte qualitative Vergleich der spannungsoptischen Ergebnisse mit den Resultaten der FEA ist in Abbildung 69 zu sehen, dabei muss beachtet werden, dass die spannungsoptische Aufnahme Linien gleicher Hauptspannungsdifferenz zeigt und in der FEA die Hauptspannungen in erster Richtung dargestellt sind. Es war nicht möglich, die Differenz der Hauptspannungen im Postprozessor auszugeben. Trotz aller Einschränkungen, Annahmen und Vereinfachungen gibt es zwischen der experimentell bestimmten und der berechneten Spannungsverteilung Analogien, wie die Lage der Extrempunkte, die Verformung der Geometrie und die Lage von Spannungsspitzen. Diese qualitative Übereinstimmung, bei der die absoluten Werte nicht betrachtet werden, zeigt die Möglichkeit der Spannungsanalyse durch Finite-Element-Analysen und die prinzipielle Richtigkeit der verwendeten numerischen Modelle. Für quantitative Aussagen bzw. Versagensberech-

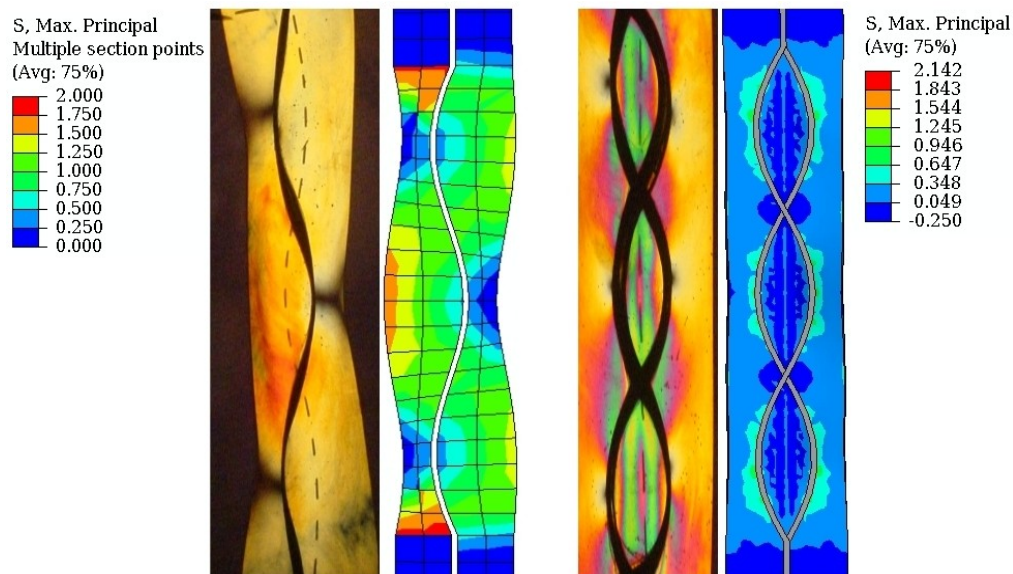


Abbildung 69: Qualitative spannungsoptische und numerische relative Spannungsverteilungen sind umfangreichere statistisch abgesicherte Werkstoffversuche und tiefgreifende Vergleiche der FE-Modelle nötig.

Die entwickelten flächigen nachgiebigen Faser-Kunststoff-Verbunde wurden mit verschiedenen Methoden untersucht. Es wurden statische und dynamische Zugversuche durchgeführt. Die Ergebnisse bestätigen die theoretischen rheologischen Modelle, da sie sowohl die nicht lineare Verformungseigenschaften als auch den steifen Anschlag kurz vor dem Versagen bestätigen. Des weiteren konnten die möglichen Bruchdehnungen analytisch berechnet werden. Mithilfe von flachen spannungsoptischen Modellen wurde die Faser-Matrix-Interaktion im flächigen N-FKV sichtbar gemacht und es konnten Schwachpunkte des Verbundes sichtbar gemacht werden. Durch die Simulation von spannungsoptischen Proben mittels FEA wurde gezeigt, dass es mit guten qualitativer Übereinstimmung möglich ist, das Verformen einer welligen steifen Faser in einer nachgiebigen Matrix abzubilden.

4 Untersuchungen seilförmiger N-FKV

Neben den flächigen Faserhalbzeugen, wie Gewebe und Gelege, können auch eindimensionale Faserhalbzeuge, Rovings, in N-FKV eingesetzt werden. Durch Verdrehen und Flechten verlaufen Rovings nicht gerade in Belastungsrichtung und erlauben dadurch geometrische Dehnungen in einer nachgiebigen Matrix, siehe [Sc06a] und [Sc06b]. Um den Einfluss und das Potential dieser Ideen abschätzen zu können, wurden eine Vielzahl von Zugversuchsreihen mit trockenen, getränkten, einzelnen, verdrehten und geflochtenen Rovings durchgeführt.

4.1 Werkstoffkomponenten für seilförmige N-FKV

Bei der Herstellung von seilförmigen N-FKV gilt wie bei den flächigen N-FKV die Prämisse, Standardfaserhalbzeuge zu verwenden. Zum einen kam bei den Roving Versuchen der 2400tex E-Glas Roving von der *Haufler GmbH* [Hau06] zum Einsatz. Dieser Roving ist grob und mit einer relativ festen Schlichte ummantelt. Daher zerfasert er auch nur wenig und ist einfach zu handhaben. Außerdem ist er günstig in der Anschaffung. Zum anderen wurde zur besseren Sichtbarkeit der Kohlenstofffaser Roving T800B 6000 von *Toray Industries Inc.* [Tor06] verwendet. Dieser Roving hat eine hohe Anzahl von Filamenten und ist sehr geschmeidig, was eine gute Verformung im Legeverfahren ermöglicht, siehe Materialkennwerte in Tabelle 23.

Tabelle 23: Mechanische Kennwerte der Rovings für seilförmige N-FKV

| Rovingtyp | Hersteller | Material | Anzahl Filamente | Festigkeit (MPa) | Zug Modul (GPa) | Dehnung (%) |
|---------------------------|-----------------|-------------|---------------------|---------------------|--------------------|----------------|
| T800B | Toray Inc. | Kohlenstoff | 12000 | 5490 | 294 | 1,9 |
| EC 14 2400 tex | Haufler GmbH | E-Glas | 2400 | 2400 | 73 | 3,3 |

Neben den mechanischen Eigenschaften sind bei der Auswahl von Halbzeugen die in Tabelle 24 zusammengefassten Merkmale zu beachten. Zwar eignen sich sowohl Glasfaser- als auch Kohlenstofffaserrovings für das Lege-Verfahren, aber beide Faserwerkstoffe haben klare Vor- und Nachteile. So wurden für die ersten Versuchsreihen (Glas2 bis Glas10) günstige Glasfaserrovings verwendet, aber die hohe Biegesteifigkeit und die schwere Tränkbarkeit bedingten in den folgenden Versuchen den Wechsel zu den Kohlenstofffaserrovings. Dieser ermöglichte es enge Radien zu legen und genauer zu arbeiten. Als Resultat entstanden filigrane Flecht- und Helixstrukturen. Außerdem sind an den schwarzen Kohlenstofffasern in der nachgiebigen Matrix die geometrischen Dehnungen wesentlich besser beobachtbar. Der deutlich höhere Preis des CF-Rovings war im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit nicht ausschlaggebend. Als Hauptnachteil des Kohlenstofffaserrovings stellte sich die Empfindlichkeit bei der Handhabung heraus. Vor allem beim Flechten trockener CF-Rovings lösten sich leicht Filamente ab und bauschten sich auf. Beim Flechten im mit Matrix ummantelten und im mit Matrix getränkten Zustand traten diese Probleme

me nicht auf. Die Roving-verstärkten seilförmigen Proben wurden mit drei verschiedenen nachgiebigen Matrices gefertigt. Es kamen zwei Silikone und eine Polyurethanmatrix zum Einsatz. In Tabelle 25 sind die verwendeten Matrices mit ihren wichtigsten Besonderheiten zusammengefasst.

Tabelle 24: Grundcharakteristika von Glas- und Kohlenstofffaserrovings

| Halbzeug | Vorteile | Nachteile | Geeignete Fertigungsverfahren |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Glasfaserroving | <ul style="list-style-type: none"> – Preis – Zerfasert nicht | <ul style="list-style-type: none"> – Biegesteif – Schwer tränkbar | <ul style="list-style-type: none"> – Legen – Wickeln |
| Kohlenstofffaserroving | <ul style="list-style-type: none"> – Geschmeidig – Mech. Eigenschaften – Gute Sichtbarkeit | <ul style="list-style-type: none"> – Preis – Zerfasert leicht | <ul style="list-style-type: none"> – Legen – Wickeln |

Tabelle 25: Gegenüberstellung von Matrices zur N-FKV Herstellung

| Matrix | Besonderheiten |
|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Silikon Wacker Silikon [Wac06] | <ul style="list-style-type: none"> – Hohe Viskosität – Kalthärtend, ausreichende Verarbeitungszeit von 25min bis 12h – Weich, 1-komponentig – geringe Zugfestigkeit, 0,6 MPa – geringe Steifigkeit, 0,4 MPa bei 100% Dehnung – Schlechte Faserhaftung – Dehnungen bis ca. 300 % |
| PUR Airthane PPT80A Ethacure 300 [APC04], [Alb99] | <ul style="list-style-type: none"> – Kalthärtend, ausreichende Verarbeitungszeit bei 80°C, 20 min – Mittelhart, 2-komponentig – Gute Haftung an Glasfasern – Reißfestigkeit, 10 MPa, Steifigkeit: 9 MPa bei 100% Dehnung – Spannungsoptisch aktiv – Niedrige Viskosität, bei 80°C = 0.5 Pas (bei 100°C gut giessbar) – Dehnungen bis ca. 600 % |
| Elastosil Silikon M4641 [RuG05] | <ul style="list-style-type: none"> – Kalthärtend, Verarbeitungszeit: 100min, Vulkanisierung: 2h bei 60°C – Weich, 2-komponentig – Transparent – Zugfestigkeit: 4,5 MPa – mittlere Viskosität, 50 Pas – Dehnungen bis 300 % |

Die Auswahl der Polyurethanmatrix basiert auf Ergebnissen von *Koschmieder*, der in [Kos00] die Fließeigenschaften, die Viskosität, Faser-Matrix-Haftung und die Laminatqualität verschiedener nachgiebiger Matrices in Bezug auf Faserverstärkungen untersuchte. Daraufhin wurden das TDI-Prepolymer Airthane PPT80A von Air Products und der aromatischer Vernetzer Ethacure 300 von der Albermale Cooperation ausgewählt. Die PUR PPT Matrix wurde auch bei den flächigen N-FKV eingesetzt, siehe Kapitel 3.1.

Es kamen zwei verschiedene Silikone zum Einsatz. Zum einen ein Einkomponentensilikon von Wacker Chemie [Wac06]. Es ist einkomponentig, kalthärtend und in Kartuschen verfügbar.

Diese Silikonmatrix kam ausschließlich bei der Herstellung von Glasfaserroving-Proben zum Einsatz, da es eine gute Haftung an Glasfasern hat. Außerdem eignete es sich aufgrund der hohen Viskosität sehr gut zum Einmassieren in den groben Glasfaserroving.

Als zweite Silikonmatrix wurde Elastosil M4641, hergestellt von Wacker Chemie [Wac06] und vertrieben von der R&G GmbH [RuG05], gewählt. Diese zweikomponentige Matrix hat eine niedrigere Viskosität und eignete sich somit zum Gießen und zum Vakuum ziehen. Alle CF-Roving verstärkten Proben wurden mit Elastosil M4641 als Matrix gefertigt.

4.2 Versuchsaufbau und Durchführung

Die Zugversuche erforderten die Herstellung zahlreicher Roving-Zugproben. Die Probenabmessungen orientierten sich an EN ISO 527-5 sind für verstärkte Kunststoffproben. Die Probenlänge aller seilförmiger Proben war 250 mm, wobei die Klemmbereiche jeweils 50 mm waren. Die Dicke bzw. der Durchmesser der Proben war bei jeder Versuchsreihe anders. Die verschiedenen Probenreihen hatten die in Tabelle 26 dargestellten Merkmale. Bei den Versuchen stellte die Einspannung einzelner Rovings eine besondere Herausforderung dar. Für die Textilindustrie entwickelte Fadenprüfverfahren nach *Loy*, [Loy89] konnten nicht angewandt werden, da nicht nur trockene Rovings untersucht wurden. Nach Versuchen mit einer Rolleneinspannung (Abbildung 70 links), welche zwar eine sanfte Krafteinleitung darstellte, aber rutschte, wurden die Enden der Rovings in UP-Harz eingegossen. Trockene Rovings konnten gut eingegossen werden, obwohl die Handhabung der empfindlichen Fasern schwierig war. Es kam trotz großer Vorsicht vor allem bei trockenen CF-Roving Proben zum vereinzelt Ausfasern von Filamenten. Das Eingießen der getränkten Rovings erfolgte in mehreren Schritten, da an den mit Silikon oder Polyurethan beschichteten Strängen keine feste Matrix haftet. Es wurden zuerst mit einer nachgiebigen Matrix getränkte Rohlinge mit trockenen Enden vorbereitet, wobei die trockenen Roving Enden dann in UP-Harz eingebettet wurden. Durch die Abdichtung der Gussformen mit Silikon stieg kein UP-Harz durch Kapillarwirkung in den trockenen Rovings auf. Die Klemmung der angesetzten Harzenden erfolgte in der servohydraulischen Prüfmaschine durch hydraulische Klemmbacken. Ein Fertigungsproblem stellte der Übergang zwischen fester und nachgiebiger Matrix dar. Teilweise lagen die Rovings in diesen Bereichen frei, teilweise wurde die nachgiebige Matrix von der festen Matrix umschlossen. Außerdem konnte eine gerade Einleitung der Rovings in die steifen Klemmbereiche nicht immer erreicht werden.

Tabelle 26: Merkmale der seilförmigen Probenreihen

| Proben-reihe | Proben-anzahl | Roving Anzahl | Ø [mm] | Matrix | Herstellung |
|----------------|---------------|---------------|--------|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Glas2 | 5 | 1 | 1 | --- | Roving trocken zuschneiden und Enden eingießen |
| Glas5 | 5 | 1 | 2 | PUR | Roving mittig tränken und Enden eingießen |
| Glas6 | 5 | 3 | 3 | Elastosil | Rovings flechten, Mitte tränken und Enden eingießen |
| Glas7 | 5 | 1 | 2 | Elastosil | Roving um 720° verdrehen, Mitte tränken und Enden eingießen |
| Glas8 | 5 | 1 | 2 | Elastosil | Roving um 360° verdrehen, Mitte tränken und Enden eingießen |
| Glas9 | 5 | 3 | 3 | --- | Rovings flechten und Enden eingießen |
| Glas10 | 2 | 6 | 4 | --- | Zwei Rovings verdrehen und dann verflechten, Enden eingießen |
| CR1 | 5 | 3 | 2 | --- | Roving trocken zuschneiden und Enden eingießen |
| CR2 | 5 | 3 | 3 | Elastosil | Rovings mittig Vakuum tränken + aushärten, flechten, Enden eingießen |
| CR3 | 5 | 3 | 3 | Silikon | Rovings mittig ummanteln + aushärten, flechten, Enden eingießen |
| CR4 | 5 | 3 | 5 | Elastosil | Rovings flechten, Vakuum tränken + aushärten, Enden eingießen |
| CR5 | 5 | 3 | 5 | Silikon | Rovings flechten, mittig ummanteln + aushärten, Enden eingießen |
| Helix-1 | 1 | 2 | 7 | Elastosil | Silikonkern fertigen, zwei Rovings phasenversetzt um den Kern wickeln, nachgiebige Hülle gießen, Enden eingießen |
| Helix-2 | 1 | 1 | 7 | Elastosil | Silikonkern fertigen, einen Roving um den Kern wickeln, nachgiebige Hülle gießen, Enden eingießen |
| Helix-3 | 1 | 1 | 7 | Elastosil | Silikonkern fertigen, einen Roving um den Kern wickeln, nachgiebige Hülle gießen, Enden eingießen |
| Helix-4 | 1 | 1 | 7 | Elastosil | Silikonkern fertigen, einen Roving um den Kern wickeln, nachgiebige Hülle gießen, Enden eingießen |
| Helix-5 | 1 | 2 | 7 | Elastosil | Silikonkern fertigen, zwei Rovings phasengleich um den Kern wickeln, nachgiebige Hülle gießen, Enden eingießen |

Die Zugversuche an den nicht helixförmig verstärkten Probenreihen wurden mit einer Geschwindigkeit von 5 mm/min weggesteuert durchgeführt und es wurden die Kraft-Weg-Verläufe aufge-

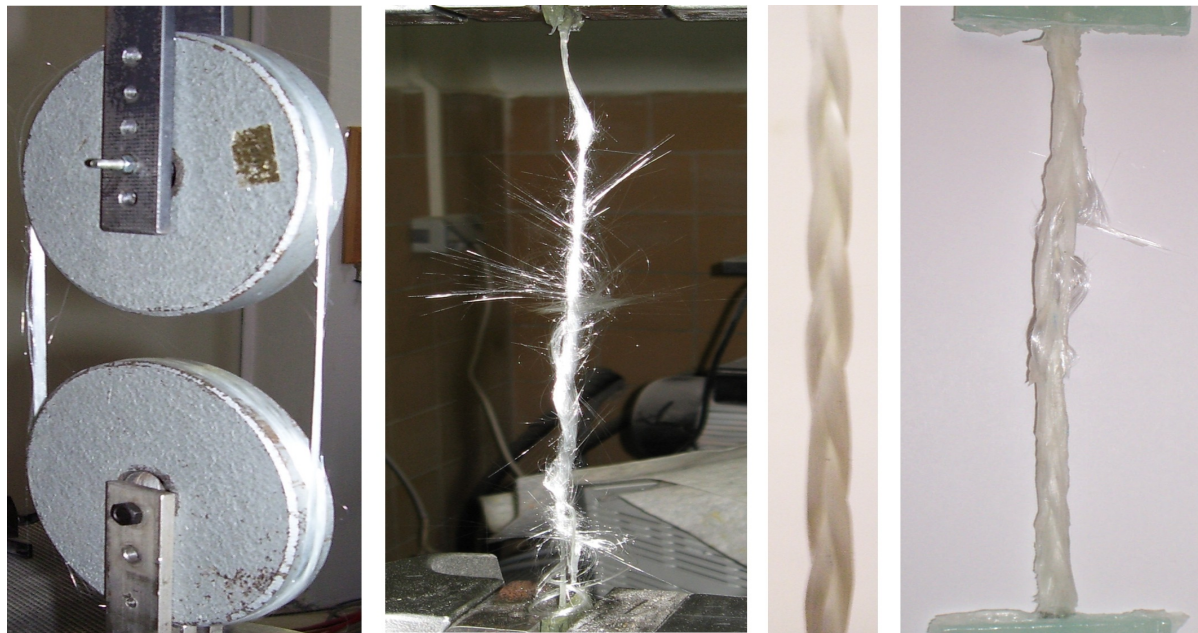


Abbildung 70: Rolleneinspannung, gerissener Roving, Geflecht, gerissenes getränktes Geflecht genommen. Aus diesen wurden die Spannungs-Dehnungs-Kurven bestimmt. Je Probenreihe wurden fünf Proben gefertigt und untersucht. Zum Vergleich der Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen wurden die Mittelwerte und die Standardabweichung jeder Probenreihe bestimmt. Die Bruchdehnung wurde als Dehnung bei Erstversagen definiert.

Die Spannungs-Dehnungs-Verläufe der Probenreihen wurden mittels einzelner charakteristischer Proben verglichen. Zur Fertigung der helixförmigen Proben waren folgende Schritte nötig:

- Fertigung des nachgiebigen Kerns (evakuieren einer zylindrischen Form)
- Wickeln des trockenen Rovings um den Kern
- Positionieren des umwickelten Kerns in einer zylindrischen Form
- Fertigen der nachgiebigen Hülle (evakuieren der zylindrischen Form mit eingelegtem Kern)
- Eingießen der freien (trocknen) Rovingenden in UP-Harz

Die Übergangsstelle zwischen nachgiebiger und steifer Matrix stellte wieder ein Problem dar, welches durch das Einbetten der nachgiebigen Matrix in den steifen Klemmbereich gelöst wurde. Die Einzelschritte und die damit verbundenen Aushärtezeiten ermöglichten die Fertigung nur weniger Proben, welche aber ausreichten das prinzipielle Verhalten von helixförmigen Faserverstärkungen zu zeigen. Daher wurden die Proben auch nicht bis zum Versagen belastet (nur Probe Helix-4 versagte ungewollt), sondern um einen vorgegebenen Weg gedehnt und wieder entlastet. So konnte das Steifigkeitsprofil der Proben ermittelt werden und die Rückdehnbarkeit festgehalten werden.

4.3 Gedrillte und geflochtene E-Glas Rovings in nachgiebigen Matrices

In der Versuchsreihe Glas2 wurden in statischen Zugversuchen die mechanischen Eigenschaften des in Tabelle 23 vorgestellten trockenen E-Glas Rovings EC2400tex bestimmt. Diese sind in Tabelle 27 zusammengefasst und stimmen gut mit den vom Hersteller und von *K. Moser* aufgeführten Werten überein. Der Einfluss von Verdrehung auf die mechanischen Eigenschaften von

Tabelle 27: Vergleich der Materialkennwerte für EC 2400 tex

| | Zugfestigkeit (MPa) | Zug Modul (GPa) | Bruchdehnung (%) |
|----------------------|---------------------|-----------------|------------------|
| Haufler GmbH [Hau06] | 2400 | 73 | 3,3 |
| K. Moser [Mos92] | 2350 | 74 | 3 |
| Zugversuch Glas2 | 1972 +/- 89 | 79 +/-3 | 2,8 +/- 0,2 |

trockenen Rovings wurde an den Versuchsreihen Glas7 und Glas8 im Vergleich zur Versuchsreihe Glas2 ermittelt. Hierzu wurden die Versuchsreihe Glas7 um 720° auf 100 mm Probenlänge und die Versuchsreihe Glas8 um 360° auf 100 mm Probenlänge verdreht. In Abbildung 71 sind die Zugfestigkeiten signifikanter Proben der Versuchsreihen mit verdrehten Rovingverstärkungen im Vergleich zu den Proben der Versuchsreihen mit geraden Rovings dargestellt. Dazu wur-

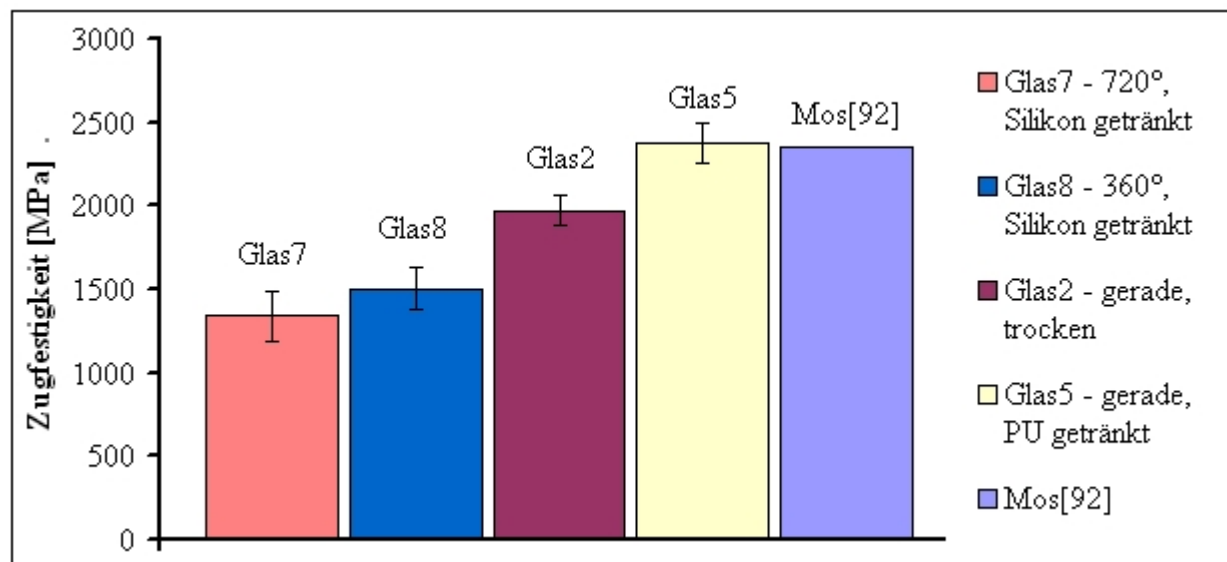


Abbildung 71: Einfluss von Verdrehung von E-Glas Rovings auf deren Zugfestigkeit

de der Literaturrichtwert nach *K. Moser* vergleichend eingefügt. Deutlich ist eine Abnahme der Zugfestigkeit mit zunehmender Verdrehung des Rovings zu erkennen. Bei einer Verdrehung von 720° auf 100 mm hat ein silikonisierter E-Glas Roving (Glas7) nur noch 67 % der Festigkeit des geraden trockenen Rovings (Glas2). Im Vergleich zu einem geraden mit Polyurethan getränkten Roving (Glas5) hat der um 360° gedrehte Roving (Glas8) nur 63 % der Festigkeit. Der Einfluss der verschiedenen Matrices (Silikon und Polyurethan) auf die mechanischen Eigenschaften konnte nicht nachgewiesen werden. Die Verdrehung der Rovings geht, wie in Abbildung 72 zu sehen,

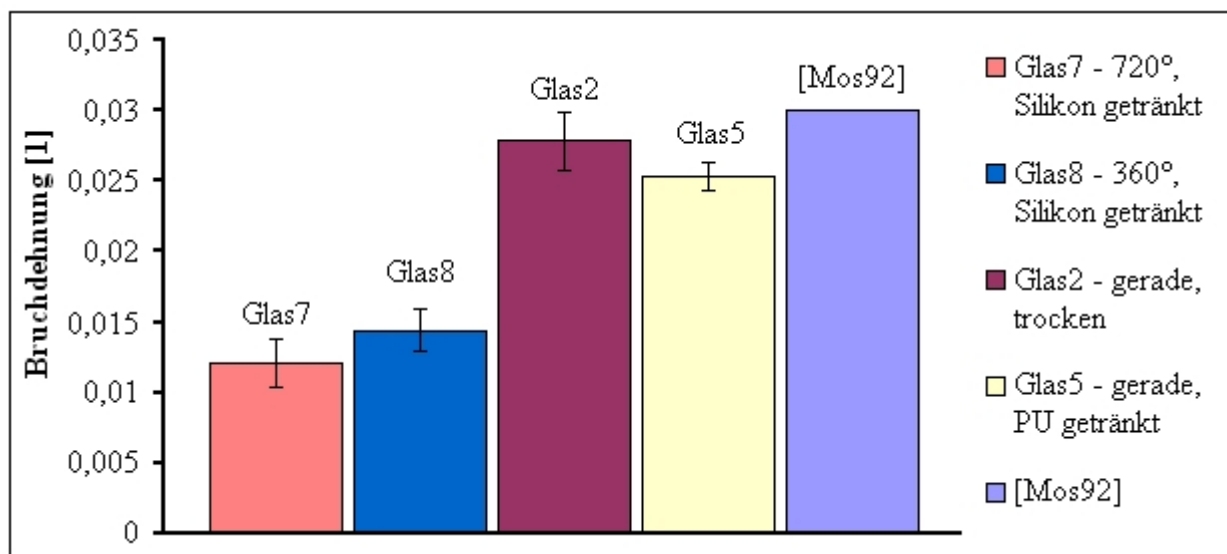


Abbildung 72: Einfluss der Verdrehung von E-Glas Rovings auf deren Bruchdehnung

mit einer Verringerung der Dehnbarkeit einher. Die Rovings versagen bei wesentlich kleineren Dehnungen als die ursprüngliche Roving-Bruchdehnung ist. Die Unterschiede in der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung zwischen Glas2 und Glas5 liegen in der Tränkung der Proben von Glas5 mit Polyurethan. Die Matrix bedingt eine höhere Zugfestigkeit, da die Belastung gleichmäßiger auf alle Filamente verteilt wird. Die Bruchdehnung der Proben von Glas5 ist kleiner als bei Glas2, da die Matrix die Bewegung der Filamente behindert.

Das Ziel, die Herstellung eines Verbundwerkstoffes mit einem J-förmigen Spannungs-Dehnungs-Verlauf, konnte mit verdrehten Rovings nicht zufriedenstellend erreicht werden.

Der Einfluss des Verflechtens von Rovingverstärkungen auf die mechanischen Eigenschaften eines seilförmigen N-FKV wurde in den Zugversuchsreihen Glas6, Glas9 und Glas10 untersucht. Wie in Abbildung 73 dargestellt, unterscheiden sich die Spannungs-Dehnungs-Verläufe der unterschiedlichen Flechtstränge im Anfangsbereich, welcher durch das Setzen und Strecken der Rovings in der Verflechtung gekennzeichnet ist. Im Vergleich zum geraden und trockenen E-Glas Roving (Glas2) haben alle geflochtenen Probenreihen eine geringfügig kleinere Steifigkeit. Es werden bei den Probenreihen Glas6, Glas9 und Glas10 größere Bruchdehnungen als bei der Reihe Glas2 erreicht, wobei die Flechtstränge einen nicht linearen Steifigkeitsverlauf haben. Die Verflechtung und damit der nicht gerade Verlauf der Fasern vergrößert den nachgiebigen Anfangsbereich vor allem wenn keine Matrix verwendet wird. So ist der Einfluss der Roving Verflechtung bei der mit Silikon getränkten Reihe Glas6 zwar vorhanden, aber die Proben der trockenen Reihen Glas9 und Glas10 waren bei kleinen Belastungen nachgiebiger. Dies ist in der Tränkung der Rovings begründet, da durch das Einmassieren der hochviskosen Silikonmatrix die Rovings enger verflochten waren als bei den trockenen Varianten. Außerdem kann sich die nicht fixierte Flechtung ohne Kraft weiten oder verengen. In der Probenreihe Glas10 wurde die Kombination von Verflechten und Verdrehen getestet, indem jeweils zwei Rovings miteinander verdreht und diese Stränge dann verflochten wurden. Im Vergleich zu der einfach geflochtenen Reihe Glas9 ist der nachgiebige Anfangsbereich kleiner. Die handwerklichen Ansprüche der Herstel-

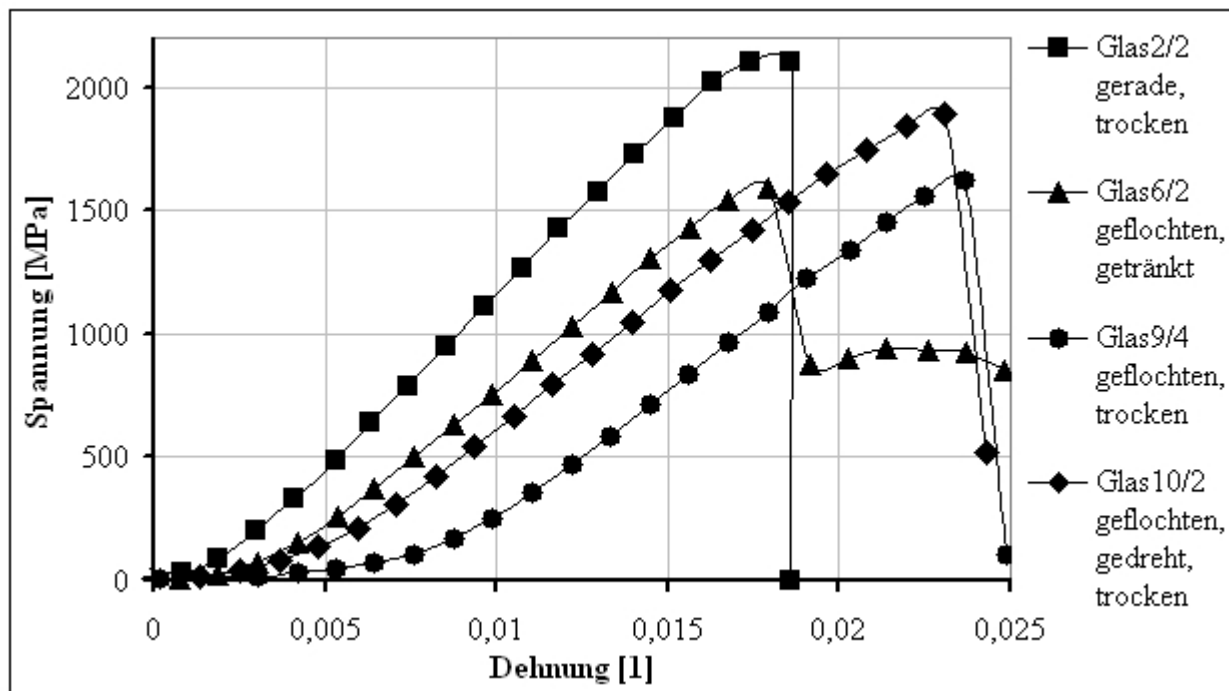


Abbildung 73: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von E-Glas Roving Flechtsträngen

lung dieser mehrfach verwundenen Proben waren sehr hoch, was zu Unregelmäßigkeiten im Flechtmuster führte.

Angeichts der Ergebnisse dieser Roving Versuche stellt das Flechten von Rovings eine Möglichkeit zur Herstellung von N-FKV dar. Es wurden in diesen Versuchen zwar keine absoluten Bruchdehnungen über 3 % erreicht, aber im Vergleich zum geraden Roving wurden Bruchdehnungen von 140 % gemessen. Die Zugfestigkeit der Flechtstränge liegt zwischen 77 % (Glas6) und 89 % (Glas10) im Vergleich zum geraden Roving (Glas2). Die Verwendung des relativ biegesteifen E-Glas Rovings führte zu Unregelmäßigkeiten in den Flechtsträngen. Die Fehler waren meist ungleichmäßig große Maschen und wechselnde Querschnitte.

Die Verwendung eines Roving Flechtstranges mit nachgiebiger Matrix als elastisches Seil bietet sich an. Der Einsatz eines solchen N-FKV Flechtstranges als künstliche Sehne ist denkbar, muss aber genauer untersucht werden.

4.4 Geflochtene Kohlenstofffaser Rovings in einer nachgiebigen Silikonmatrix

Um den Einfluss von Tränkung, Ummantelung und Verflechtung ermitteln zu können, wurden die in Abbildung 74 dargestellten fünf Flechtstrangvarianten gefertigt. Jede dieser fünf Versuchsreihen umfasste fünf Proben. Alle Stränge bestanden aus drei Kohlenstofffaser Rovings der Firma *Toray Inc.* [Tor06], da dieser Roving im Vergleich zum Glasfaser-Roving biegeweicher ist. Außerdem ist er, bedingt durch die schwarze Farbe, im verarbeiteten Zustand besser erkennbar. In einer ersten Versuchsreihe CR0 wurden die Kraft-Weg-Kurven des einfachen trockenen Kohlenstofffaser Rovings ermittelt. Im quasi-statischen Zugversuch wurden die Proben bei einer Geschwindigkeit von 5 mm/min weggesteuert belastet. Die Versuchsreihe CR0 beinhaltet die Proben C1 bis C10. Die geraden trockenen Kohlenstofffaser Rovings wurden an den Enden in UP-

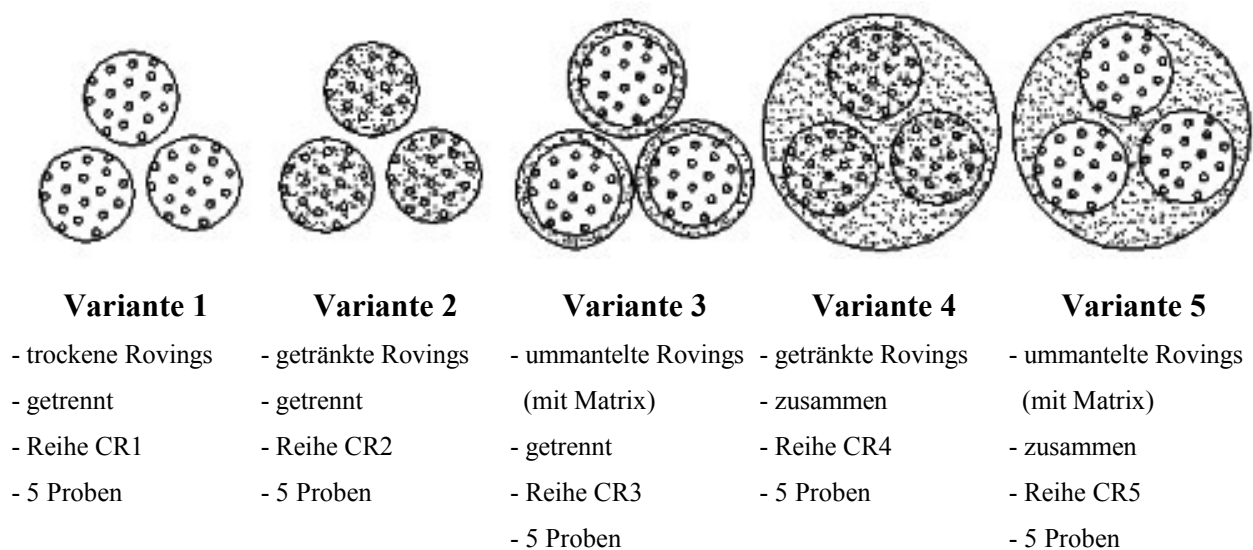


Abbildung 74: Flechtstrangvarianten mit verschiedenen Matrixapplikationen

Harz eingegossen und servohydraulisch geklemmt. Alle Proben versagten durch eine Kettenreaktion nach den ersten Filamentrissen und die reißenden Rovings bauschten sich auf. In Tabelle 28 sind experimentelle und gegebene Materialwerte gegenübergestellt. Es fällt auf, dass die untersuchten Rovings wesentlich steifer sind als vom Hersteller angegeben.

In den Versuchsreihen CR1 bis CR5 wurden die in Abbildung 74 dargestellten Flechtstrangvarianten untersucht. Dabei unterscheiden sich die Varianten eins, zwei und drei von den Varianten vier und fünf durch die fehlende Verbindung der Rovings untereinander. Durch das Zusammenfassen der Flechtstränge in den Varianten vier und fünf sind die Rovings in ihrer welligen geflochtenen Form fixiert und eine Rückverformung bei Entlastung ist möglich. Bei den Varianten eins, zwei und drei ist durch die fehlende Fixierung eine definierte Anfangswelligkeit nur durch das Aneinanderschmiegen der Rovings gegeben, da ein Flechtstrang bei gleicher Rovinglänge in Abhängigkeit von der Maschengröße unterschiedliche Streckungen bei Belastung zulässt. Bei der Herstellung der Stränge wurde eine möglichst gleichförmige Verflechtung angestrebt, wobei die handwerkliche Geschicklichkeit der Reproduzierbarkeit Grenzen setzt. Vor allem bei den getrennten Probenreihen war die Flechtung nicht konstant und damit variierte die Dehnbarkeit des Flechtstranges. Dies ist deutlich in Abbildung 75 an der Streuung der Dehnungen von Probenreihe CR2 und CR3 zu sehen.

Tabelle 28: Vergleich der Zug-Materialkennwerte für CF-Roving T800B

| | Zugfestigkeit (MPa) | Zug-Modul (GPa) | Bruchdehnung (%) |
|--------------------|----------------------------|------------------------|-------------------------|
| Toray Inc. [Tor06] | 5490 | 294 | 1,9 |
| K. Moser [Mos92] | 4800 | 210 - 250 | 5 - 10 |
| CR0 (10 Proben) | 4446 +/- 523 | 410 +/- 59 | 1,2 +/- 0,3 |

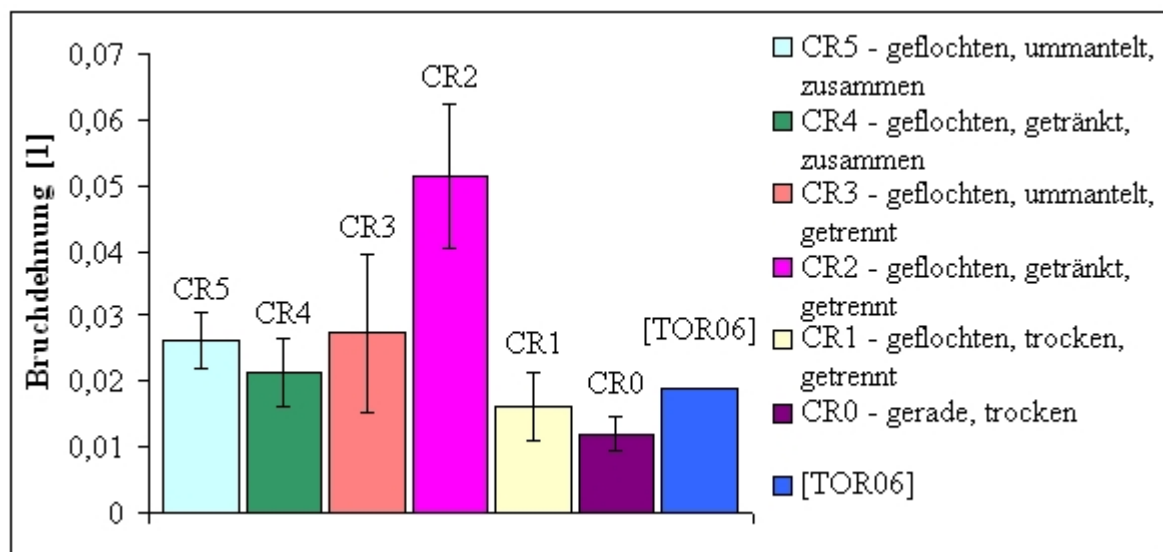


Abbildung 75: Bruchdehnungen aller CF-Flechtstrangreihen

Alle Flechtstrangvarianten haben größere Versagensdehnungen als der gerade Roving (CR0). Die relativ große Dehnbarkeit der Reihe CR3 ist in der sehr kurzen Verflechtung (viele Verschlingungen) begründet, welche im Vergleich zu den anderen Strängen wesentlich größere Dehnungen zuließ. Alle geflochtenen Varianten haben einen nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Verlauf, siehe Abbildung 76. Der nachgiebige Anfangsbereich ist mehr oder weniger ausgeprägt, wobei dieser beim trockenen Flechtstrang CR1 am kleinsten ist. Hier liegen die trockenen Ro-

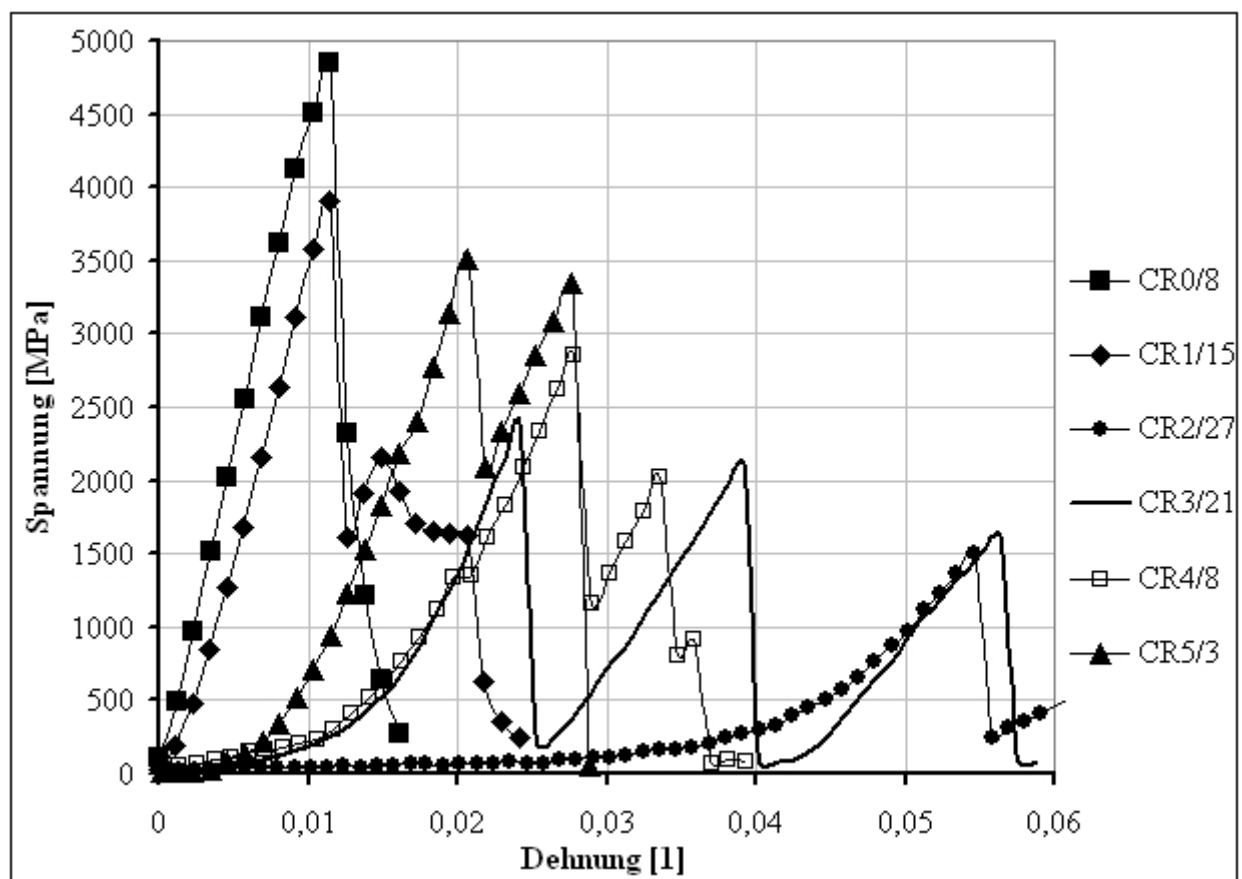


Abbildung 76: Spannungs-Dehnungs-Kurven signifikanter CF-Roving Flechtstrangproben

vings direkt aneinander und die Möglichkeit der geometrischen Dehnung ist nur im Verformen der Roving-Querschnitte selbst vorhanden und damit sehr klein. Durch das Applizieren einer nachgiebigen Matrix (zwischen den Filamenten und/oder um die Rovings) sind Dehnungen innerhalb des Flechtstranges möglich. Es wurden zwei Einflussfaktoren untersucht. Zum einen wurde der Einfluss der Tränkung bzw. Ummantelung der Rovings auf die Strangeigenschaften untersucht.

Zum anderen war die Verbindung bzw. Trennung der Rovings im Flechtstrang Gegenstand der Ermittlungen. Es wurden je zwei Probenreihen mit Proben in getrennter (CR2 und CR3) und in zusammengefasster (CR4 und CR5) Form hergestellt, wobei jeweils in einer Probenreihe die Proben getränkt (CR2 und CR4) bzw. ummantelt (CR3 und CR5) waren.

Die Zugfestigkeiten der untersuchten Varianten lagen alle unter denen des einzelnen trockenen Rovings (CR0). Hierbei ist die Zugfestigkeit der Flechtstränge immer auf den Strangquerschnitt mit drei Rovings bezogen. Die in Abbildung 77 verglichenen Zugfestigkeiten bestätigen das Fertigungsproblem der Maschenungenauigkeit, da die Ergebnisse weit streuen. Bei Betrachtung der Dehnungen und Zugfestigkeiten ist erkennbar, dass große Dehnungen mit einer geringen Zugfestigkeit einhergehen (CR2 und CR3). In diesen beiden Varianten liegen die Rovings auch getrennt vor. Vor allem bei CR2 sind Abschabungen der nachgiebigen Matrix von den Rovings zu beobachten, was auf die großen Relativbewegungen der Rovings zu einander zurückzuführen ist. Der Umkehrschluss, dass ein kleine Dehnbarkeit mit einer großen Festigkeit einhergeht, wird durch die Reihen CR4 und CR1 bestätigt.

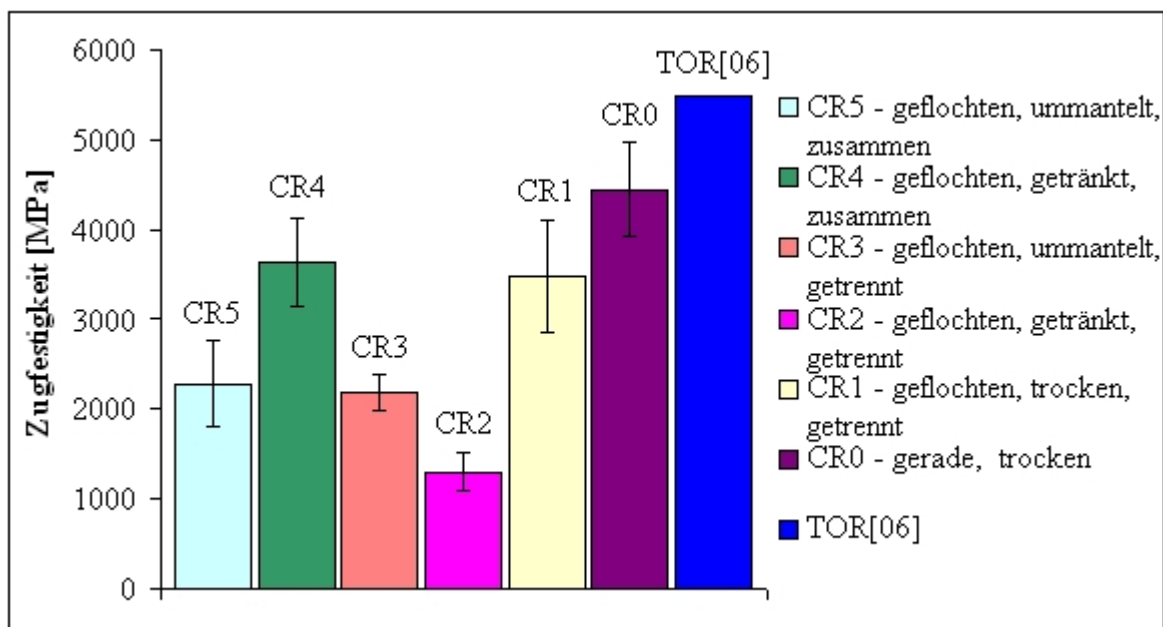


Abbildung 77: Zugfestigkeiten aller CF-Flechtstrangreihen

Durch minimale Unterschiede in den Längen der einzelnen Rovings im Flechtstrang versagten die drei verflochtenen Rovings nicht gleichzeitig sondern nacheinander. In Abbildung 78 ist der typische Kraft-Weg-Verlauf eines Zugversuches dargestellt. Jede Kraftspitze stellt das Versagen eines Rovings dar, wobei der anfängliche nicht lineare Verlauf nach dem Versagen des ersten Rovings nahezu linear wird. Die Festigkeiten der noch intakten Rovings beim Versagen der ge-

brochenen Rovings sind durchweg kleiner als die des ersten Rovings, was auf Schädigungen beim Versagen hinweist.

Die Versuche mit geflochtenen Kohlenstofffaser Rovings belegen die Eignung von zusammenge-

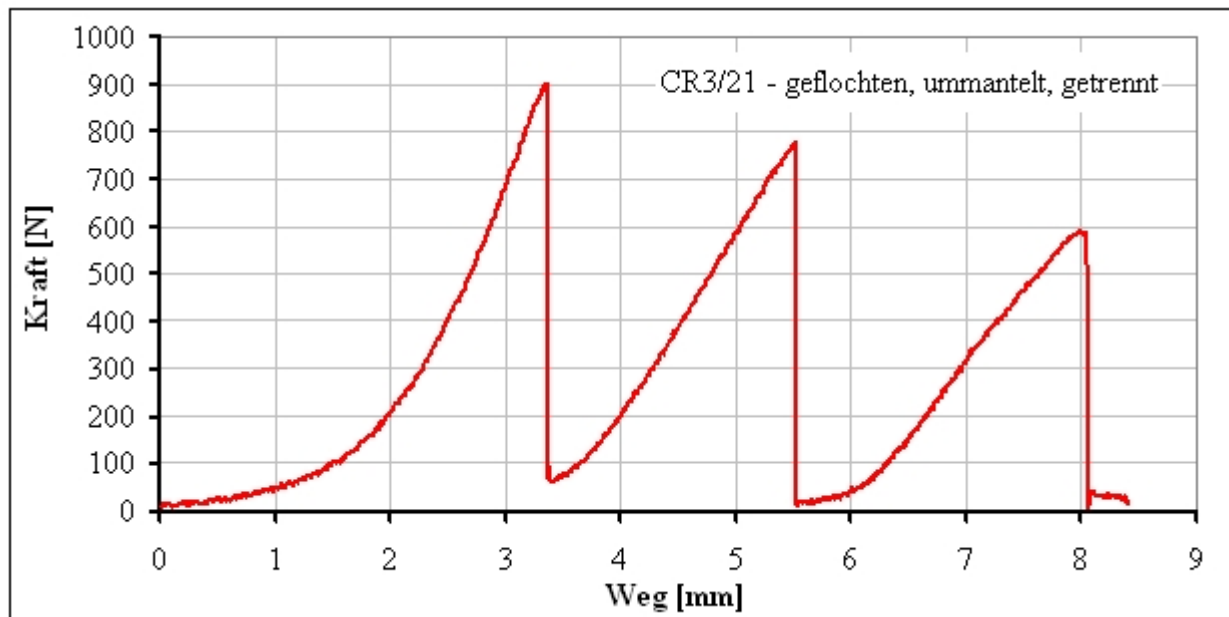


Abbildung 78: Typisches Kraft-Weg-Diagramm eines Flechtstranges, Probe CR3/21

fassten Roving-Flechtsträngen mit nachgiebigen Matrices als flexible Seilstrukturen, da die untersuchten Flechtstränge sowohl zugfest als auch flexibel waren. Die Gegenläufigkeit der Dehnbarkeit und der Zugfestigkeit zeigt aber die Grenzen der Zugflexibilität eines solchen Seils. Ein prinzipieller Unterschied zwischen getränkten und ummantelten Proben ist nicht feststellbar. Der Einfluss der Zusammenfassung der Rovings durch die nachgiebige Matrix ist durch die tendenziell höheren Zugfestigkeiten positiv. Bedingt durch die fehlende Rückstellkraft (keine Zusammenfassung der Flechtstränge) und die geringen Zugfestigkeiten sind für die Varianten CR1, CR2 und CR3 technische Anwendungen schwer vorstellbar. Die Varianten CR4 und CR5 dagegen könnten als Federelemente eingesetzt werden.

4.5 Helixförmige Kohlenstofffaser Rovings in einer nachgiebigen Silikonmatrix

Die helixförmige Verwindung von Rovings in einer nachgiebigen Matrix stellt eine weitere Möglichkeit zur Herstellung seilförmiger N-FKV dar. Die helixförmige Anordnung von Rovings in einer nachgiebigen Kunststoffmatrix ermöglicht Dehnungen der steifen Faserverstärkung. Der so erzeugte Verbundwerkstoff zeichnet sich je nach Konfiguration durch einen ausgeprägten nicht linearen Spannungs-Dehnungs-Verlauf und eine große Dehnbarkeit aus. Die hier untersuchten Proben basieren zum einen auf dem Gebrauchsmuster DE 202005020800U1 [Sc06a] und zum Anderen auf dem Prinzip des Ruckdämpfers von Forsheda [For06]. Abbildung 79 zeigt den Ruckdämpfer, ein CAD-Modell und die reale Probe. Deutlich windet sich der Roving (das Seil) um einen nachgiebigen Kern. Bei den Proben wird der Kern mit Roving von einem nachgiebigen Mantel umschlossen. Dieser dient der Fixierung und dem Schutz der Faser. Es ist möglich mehrere Rovings um den nachgiebigen Kern zu wickeln, wobei diese auch phasenverschoben ange-

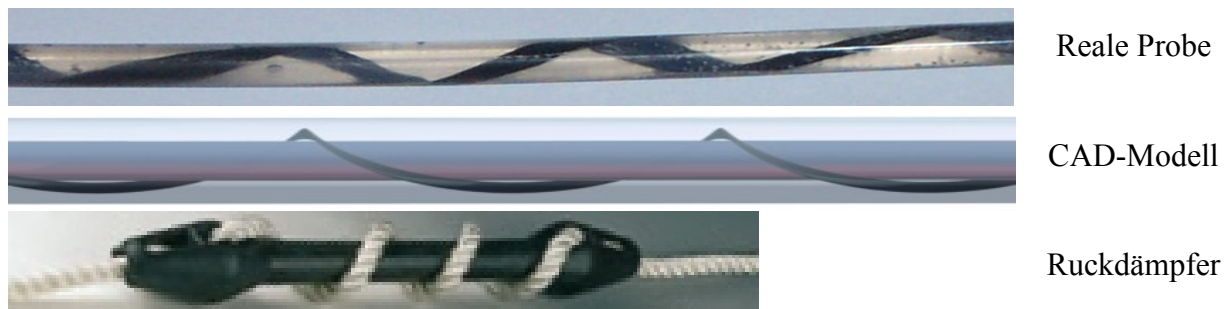


Abbildung 79: Helixförmige Strukturen, v. u. Ideengeber, Modell und Versuchskörper

ordnet sein können. Zur Auswertung der Ergebnisse der Probe H1 bis H5 sollen die Kraft-Weg-Verläufe der quasi statischen Zugversuche verglichen werden, da bedingt durch den sehr kleinen Faservolumenanteil (ein bzw. zwei Rovings in 8 mm dicken Proben) eine Spannungsanalyse nicht sinnvoll ist. Alle Proben verformten sich ähnlich. Die Rovings lenkten die freien Matrixbereiche aus, wobei in Probe H1 die phasenversetzten Rovings gegeneinander wirkten. Dazu kam es bei den Proben H2 bis H5 zu einer Drehbewegung um die Probenlängsachse und in die Abrollrichtung des gewundenen Rovings. Nur Probe H1 drehte sich nicht, da die zwei eingebrachten Rovings phasenversetzt angeordnet waren und sich die Abrollbewegungen gegenseitig aufheben. Alle Proben weisen eine Hysterese auf, welche typisch für Elastomerfedern ist. Im Bezug auf die gesamte Probe treten in der Matrix kleine Dehnungen auf, da der Matrixwerkstoff Elastosil Dehnungen bis 300 % erträgt. Dagegen treten lokal am Übergangsbereich zwischen Roving und Matrix nicht messbare große Dehnungen auf, welche sich bei Entlastung langsam zurück dehnen. Probe H1 war im Vergleich die steifste Probe, was an der kleinen Verwindung (540°) und der Gegenläufigkeit der Rovings lag. Dazu kam es zu großen Verformungen in den freien Bereichen der Matrix. In Probe H5 wurden die Rovings auch um 540° um den Kern gewunden, aber sie waren phasengleich angeordnet. Bei dieser Probe kam es zum Rutschen der Einspan-

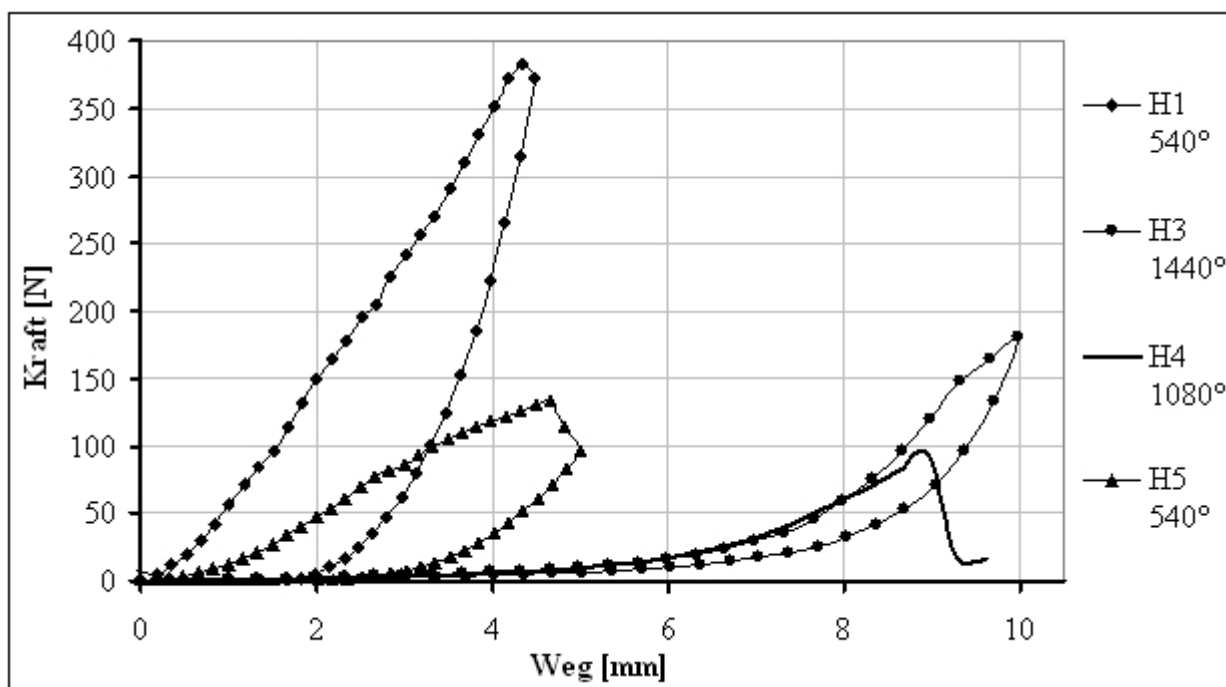


Abbildung 80: Kraft-Weg-Verläufe der helixförmig verstärkten Proben H1, H3, H4 und H5

nung, was die Ergebnisse verfälscht. Die Probe H5 war flexibler als H1, aber einen ausgeprägten nachgiebigen Anfangsbereich gibt es nicht. Anders verhielt es sich mit den Proben H2, H3 und H4, siehe Abbildung 80. Dabei fiel H2 aus dem Rahmen, da sie viel weniger steif war und Dehnungen von 19 % (40 mm Weg) ertrug, vergleiche mit Tabelle 29.

Tabelle 29: Parametrik der helixförmig verstärkten Proben

| | Helix-1 | Helix-2 | Helix-3 | Helix-4 | Helix-5 |
|----------------------------|-------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Roving-Zahl | 2 phasenversetzt | 1 | 1 | 1 | 2 phasengleich |
| Anzahl Roving Windungen | 1,5 | 10 | 4 | 3 | 1,5 |
| Roving Verdrehung [°] | 540 | 3600 | 1440 | 1080 | 540 |
| Messlänge [mm] | 170 | 210 | 180 | 180 | 190 |
| Verfahrweg [mm] | 5 | 40 | 10 | 10 | 5 |
| Maximale Dehnung [%] | 2,9 | 19 | 5,5 | 5,5 | 2,6 |
| Bemerkungen | - Sehr steif - Fast linear | - Sehr nachgiebig - Nicht linear | - nachgiebig - Nicht linear | - nachgiebig - Nicht linear - Versagt | - Steif - Einspannung rutscht - Fast linear |

Wie in Abbildung 81 zu erkennen, zeigte die Probe H2 eine ausgeprägte J-Kurve als Kraft-Weg-Verlauf und auch die Rückdehnung erfolgte zeit verzögert komplett. In Probe H2 war der Roving um 3600° (10 Windungen) um den Elastosil Kern gedreht. Dadurch ergab sich eine sehr große Dehnbarkeit. Die Matrix verformte sich bedingt durch die kurzen Windungsabstände sehr stark. Die Proben H3 und H4 hatten annähernd den gleichen Aufbau. Der Roving war um 1440° bzw. 1080° um den Kern gewickelt. Der Kraft-Weg-Verlauf beider Proben ist nicht linear und der nachgiebige Anfangsbereich ist ausgeprägt. Die Proben wurden um 10 mm gedehnt (5,5 %), wobei Probe H4 an der Einspannung versagte.

Die hier vorgestellten Versuche an seilförmigen Proben mit helixartiger Verstärkung zeigten trotz der mangelnden statistischen Absicherung die Möglichkeiten von nachgiebigen Faser-Kunststoff-Verbunden in flexiblen Seilstrukturen. Es konnten große Dehnungen nachgewiesen werden, wobei die Rückdehnung langsam erfolgte.

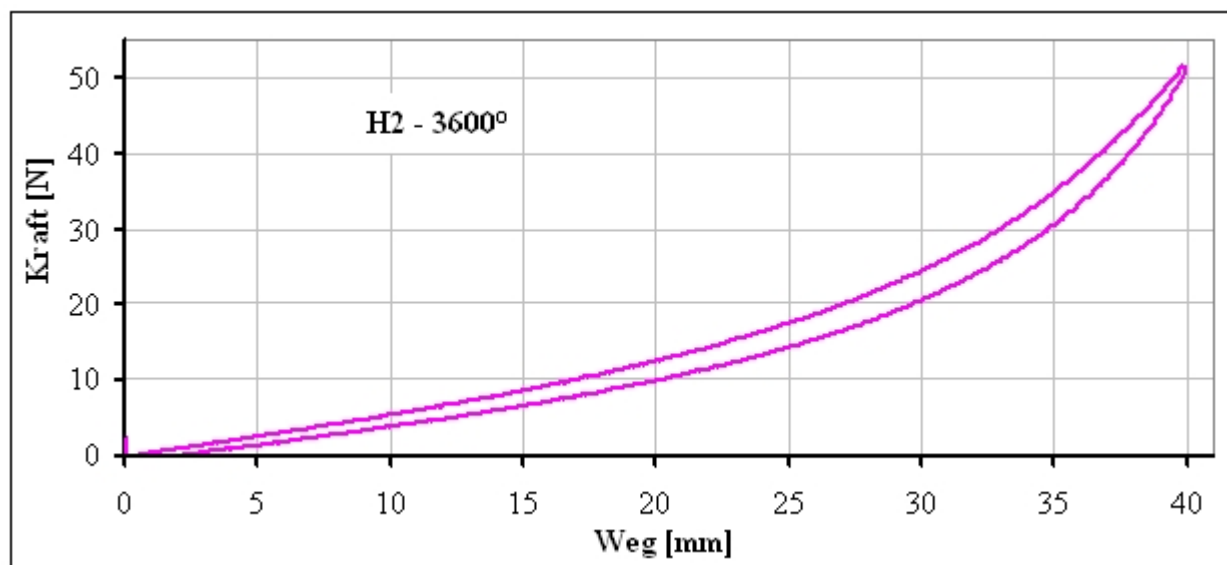


Abbildung 81: Kraft-Weg-Verlauf der helixförmig verstärkten Probe H2

4.6 Diskussion der Untersuchungen von seilförmigen N-FKV

Durch die Kombination einer nachgiebigen Silikonmatrix mit welligen Rovings ist es möglich, flexible seilförmige Strukturen zu fertigen. Die Welligkeit der Verstärkungsfasern wird durch Verdrehen, Flechten und durch das helixförmige Umwickeln eines flexiblen Kerns erreicht. In diesen drei Ansätzen sind die Rovings so verformbar angeordnet, dass die zugsteifen Fasern unter Belastungen geometrisch nachgeben können.

Die wichtigsten Ergebnisse der Zugversuche an Proben mit verdrehten und geflochtenen Rovingverstärkungen sind:

- Das Verdrehen von Roving-Verstärkungen führt zu einer geringeren Zugfestigkeit des Verbundes, wobei der Verbund kaum flexibler wird.
- Der Einfluss der Verdrillung von Rovings auf den Spannungs-Dehnungs-Verlauf war nicht nachweisbar.
- Das Flechten trockener Rovings ist ohne Schädigung von Filamenten kaum möglich.
- Trockene Roving-Flechtstränge haben keine definierte Ausgangslänge und haben einen quasi linearen Spannungs-Dehnungs-Verlauf.
- Bei Flechtsträngen mit nachgiebiger Matrix versagen die Rovings nicht gleichzeitig, sondern nacheinander.
- Die mit CF-Roving Flechtsträngen verstärkten seilförmigen N-FKV erreichten Bruchdehnungen von 2,75%.
- Ein Einfluss verschiedener nachgiebiger Matrices auf das Werkstoffverhalten von seilförmigen N-FKV konnte nicht nachgewiesen werden.
- Helixförmig verstärkte N-FKV haben einen ausgeprägten J-förmigen Spannungs-Dehnungsverlauf und ermöglichen große Dehnungen.

- In Abhängigkeit von der Steigung der Verstärkungsfaserhelix können verschiedene Spannungs-Dehnungs-Verläufe realisiert werden. In den Versuchen konnten 19% elastische Dehnung erreicht werden (Helix-2).

Die Versuche an helixförmig verstärkten N-FKV sind aufgrund der geringen Anzahl von Proben nicht statistisch abgesichert. Es konnten im Rahmen dieser Arbeit nur fünf verschiedene Proben gefertigt werden, da die Fertigung sehr langwierig ist. Da die Proben sehr nachgiebig waren, ist der relative Maschinenmessfehler groß und die Ergebnisse ungenau. Trotzdem wurde das prinzipielle Werkstoffverhalten bei Zugbelastung deutlich und über diese Arbeit hinausgehende Untersuchungen erscheinen lohnenswert.

5 Zusammenfassung und Ausblick

5.1 Zusammenfassung

Aufgrund dieser Arbeit kann gesagt werden, dass N-FKV als eine neue Kompositengruppe angesehen werden können. Diese Arbeit geht weiter als vorhergehende Untersuchungen, da nicht nur der Schritt von der steifen zur nachgiebigen Matrix im Komposit gegangen, sondern auch dem versteiften Verbund eine große Verformbarkeit gegeben wurde. Damit ist es möglich, hochelastische Federn und Strukturen zu fertigen, welche sich bei steigender Belastung verfestigen und nach einer nachgiebigen Phase die Steifigkeit von klassischen FKV aufweisen.

Im Rahmen der Recherche wurden bekannte Anwendungen verstärkter nachgiebiger Kunststoffmatrices analysiert und mögliche Materialkomponenten für die N-FKV erarbeitet und mit einander verglichen. Die hier hauptsächlich untersuchte Polyurethanmatrix kann problemlos mit Fasern verstärkt werden, was von *Koschmieder* [Kos00] festgestellt wurde. Dabei wurde der J-förmige Spannungs-Dehnungs-Verlauf von Sehnen und das damit einhergehende nicht lineare Werkstoffgesetz als Zielvorgabe für den neuen FKV adaptiert. Zusätzlich wurden in Anlehnung an bekannte Kunststoff- und Sehnenmodelle rheologische Modelle für N-FKV erstellt.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wurden mit Hilfe der Konstruktionsmethodik Prozessanforderungen und Herstellungsverfahren für N-FKV entwickelt, bewertet und verglichen. Parallel dazu wurden die theoretischen Verfahren praktisch getestet. Zur Fertigung von flächigen Werkstoffproben mit definierter reproduzierbarer 2D-Welligkeit wurden im Rahmen dieser Arbeit mehrere Mechanismen entwickelt, welche verschiedene gängige flächige Standardhalbzeuge verarbeiten. Es konnte gezeigt werden, dass eine reproduzierbare qualitativ hochwertige laminierbare Faserwelligkeit gefertigt werden kann.

Die mit flächigen nachgiebigen Faser-Kunststoff-Verbunden (PUR Matrix mit Glasgewebe- und Glaslegeverstärkung) erreichbaren Dehnungen sind in Abhängigkeit vom Welligkeitsverhältnis analytisch berechenbar, wobei ein Zusammenhang mit dem verwendeten Halbzeug nicht festgestellt wurde. Es wurden in experimentellen Untersuchungen flächige N-FKV mit Bruchdehnungen von 5 % bis 22 % hergestellt und getestet. Dabei zeigten alle Proben einen nicht linearen Spannungs-Dehnungs-Verlauf mit zwei Steifigkeitsbereichen. Für diese Bereiche wurden bei den Probenreihen mit PUR-Matrix Tangentenmoduln von 0,2 bis 7,2 GPa bzw. von 3,6 GPa bis 23 GPa ermittelt. Gleichzeitig erreichten die N-FKV eine ähnliche Kurzzeit-Festigkeit wie geradlinig verstärkte FKV. Bei den phasenversetzt gewellten mehrlagigen Verbunden trat eine Aufhebung der hohen Elastizität auf. Diese Schichtverbunde hatten eine nahezu lineare Spannungs-Dehnungs-Kurve im Belastungsverlauf und bildeten somit die angestrebte J-Kurve im Spannungs-Dehnungs-Verlauf nicht aus. Dagegen zeigten phasengleich angeordnete wellige Verstärkungslagen das gleiche Verhalten wie einzelne Lagen. Bei ungenauer Positionierung der Lagen (kleine Phasenverschiebung zwischen den Welligkeiten) traten zwischen den Lagen Schubspannungen auf, was zum vorzeitigen Versagen des Verbundes führte. Sind die Welligkeitsverhältnis-

se der einzelnen Lagen leicht unterschiedlich, versagt die Lage mit dem kleinsten Welligkeitsverhältnis zuerst und damit dann der gesamte Verbund.

Die dynamischen Versuche offenbarten zwei prinzipielle Schwächen der flächigen N-FKV. Zum einen kam es wiederholt zum Versagen an den Einspannungen, da der wellige Faserbereich bis in die Einspannung reichte. Zum anderen zeigten die verwendeten gewellten Gewebe schon bei kleinen Lastwechselzahlen Ermüdungserscheinungen im Sinne von Delaminationen an den Fadenkreuzungen. Diese Delaminationen (sichtbar als weiße Streifen) entstanden durch Schubspannungsspitzen an den Roving- und Faserflanken. Die über den gesamten welligen Bereich verteilten Delaminationen führten zwar nicht direkt zum Versagen, aber zu einem Steifigkeitsverlust.

Neben spannungsoptischen Versuchen an flächigen N-FKV wurden einfache numerische Simulationen mit der Finite-Elemente-Methode durchgeführt. In beiden flächigen Spannungsanalyseverfahren waren die Ergebnisse qualitativ vergleichbar. Beide Analysen zeigten Spannungsspitzen an den Übergängen vom geraden zum welligen Bereich und spannungsfreie Punkte an den Extrempunkten. An der Stelle des maximalen Auslenkwinkels Θ_{Max} gibt es einen Spannungssprung am Roving, welcher sich mit dem Ort des häufigsten Versagens bei den N-FKV Zugproben deckt.

Um das Potential der Faserwelligkeit in seilförmigen Strukturen abschätzen zu können, wurden verschiedene Rovingproben mit Verdrillungen, Flechtungen und helixförmiger Anordnung von Rovingverstärkungen getestet. Hierbei war der Einfluss der Verdrillung auf den Spannungs-Dehnungs-Verlauf getränkter Rovingproben nachweisbar. Mit zunehmender Verdrillung sank die Zugfestigkeit des Rovings bei nahezu gleich bleibender Bruchdehnung. So lag die Zugfestigkeit der um 720° verdrehten Proben (Glas7) bei 60 % der Zugfestigkeit der gestreckten Proben (Glas2). Die geflochtenen Roving-Stränge zeigten einen nicht linearen Spannungs-Dehnungs-Verlauf und im Vergleich zu gestreckten Rovings größere Bruchdehnungen. Es konnte kein Unterschied in den mechanischen Eigenschaften zwischen ummantelten und getränkten CF-Rovingen festgestellt werden. Die Fertigungsmethoden für helixförmig verstärkte Zugproben konnten praktisch umgesetzt werden und die untersuchten Proben ermöglichten geometrische Dehnungen bis 19 % bei kompletter Rückdehnung. Die in dieser Arbeit getesteten Flechtungen und helixförmigen Verstärkungen in nachgiebigen Elastomeren ließen teilweise große geometrische Dehnungen zu. Besonders die Varianten des hyperelastischen Seils [Sc06b] mit ummantelten geflochtenen Rovings sind als Verstärkung für seilförmige N-FKV geeignet.

5.2 Ausblick

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Experimente und Analysen zeigen weitere Forschungsmöglichkeiten und Richtungen auf. Ausgehend von der Arbeit von *Koschmieder* [Kos00] wurde hauptsächlich mit einer nachgiebigen duromeren Polyurethanmatrix gearbeitet. Zwar kamen bei den Versuchen auch Silikone zum Einsatz, aber weitere Untersuchungen zum Einfluss der mechanischen Eigenschaften der Matrix auf das Werkstoffverhalten der N-FKV sind notwendig. Eine mögliche Alternative könnten thermoplastische Elastomere (TPE) darstellen. Diese Polymerklasse kombiniert mechanische Eigenschaften von Elastomeren und Verarbeitungspara-

ter von Thermoplasten miteinander. Neben der Validierung von möglichen Werkstoffkomponenten sind vor allem dynamische Werkstoffanalysen nötig. Die in dieser Arbeit vorgestellten dynamischen Versuche stellen nur einen ersten kleinen Einblick in das Verhalten bezüglich dynamischer Belastungen dar. Um N-FKV im medizinischen Umfeld, sei es in der Robotik, der Prüftechnik, siehe [KBM06], oder für in-vivo-Anwendungen zu etablieren, ist ein nachgewiesenes gutes Langzeitverhalten ebenso wichtig wie Studien zur biologischen Verträglichkeit.

Ein weiteres Forschungsfeld ist die Krafteinleitung in den N-FKV, da die Belastung einer nachgiebigen Matrix mit großen Querkontraktionen einhergeht, ausgehärtete nachgiebige Polymere schlecht klebbar sind und die Streckung der welligen Fasern nicht behindert werden darf. In den experimentellen Untersuchungen an flächigen N-FKV wurden die Flachproben hydraulisch eingeklemmt, wobei häufig das Versagen direkt am Anfang der Klemmung stattfand. Vor allem bei dynamischen Belastungen ist die Krafteinleitung entscheidend für das Langzeitverhalten eines N-FKV. In Abbildung 50 sind die verschiedenen Positionen für eine Klemmung gezeigt, wobei der Klemmbereich die welligen Fasern nicht erreichen sollte. Bei einem FKV sind zwar die Fasern die Hauptlastträger, aber die Krafteinleitung und Verteilung erfolgt über die Matrix in die Fasern. In einem N-FKV müssen die Fasern in den Krafteinleitungsbereich reichen und dies in gestreckter Form. In Abbildung 82 ist der ideale Amplitudenverlauf über die Bauteillänge dargestellt. Es sollte an den Krafteinleitungsstellen Bereiche mit keiner Amplitude (gestreckter Faseroving), dann Bereiche mit steigender und fallender Auslenkung und den „Arbeitsbereich“ mit konstantem Welligkeitsverhältnis geben.

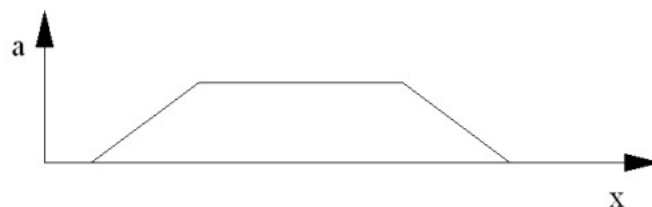


Abbildung 82: Welligkeitsamplitude a im Verlauf der Probenlänge x

Eine andere Möglichkeit der Krafteinleitung ist bei natürlichen Muskeln und Sehnen zu finden. Hier laufen Muskeln und Sehnengewebe ineinander, wobei eine Art Schäftung bzw. Umstülpung entsteht. Die Sehne hört nicht abrupt auf, sondern verzweigt sich immer feiner im Muskel. Zusätzlich fasert sich die Sehne beim Einlauf in die Knochenhaut auf und die Kräfte werden verteilt zum Knochen geleitet, wie in Abbildung 83 dargestellt. Um die Verwölbung stark gewellter flacher Proben aufzuheben, können diese frei geschnitten werden. Dabei werden die im Schema in Abbildung 84 schraffierten Bereiche mit nicht durchlaufenden Fasern weggeschnitten. Bei der Probenreihe PU25 wurde dies durchgeführt und die Proben streckten sich nahezu komplett. Auf die Festigkeit hatte das Freischneiden keinen Einfluss, da die lasttragenden durchgehenden Faserstränge nicht beschnitten wurden. Nach dem Versagen wiesen die beschnittenen Proben einen weniger ausgeprägten Restfestigkeitsbereich auf, da die äußeren querverbindenden Gewebebereiche fehlten. Ebenso verringerte sich die Steifigkeit im Anfangsbereich der Verformung, da die Steifigkeit der zu verformenden Außenbereiche nicht vorhanden war. Damit wies Probenreihe 25PU einen sehr starken Steifigkeitssprung zwischen den beiden Tangenten E-Modulen auf.

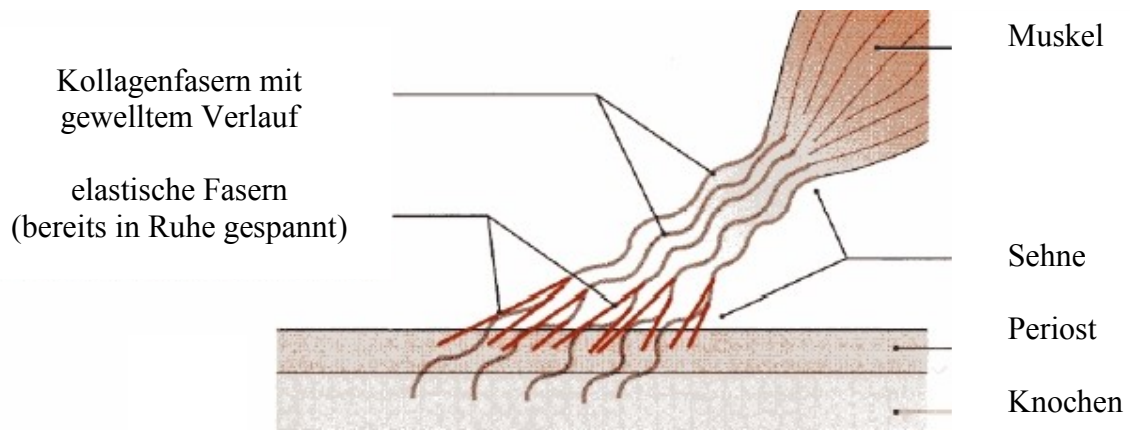


Abbildung 83: Knochen - Sehnen - Muskel - Verbindung [Wag06]

Für den neuen Werkstoff N-FKV sind im Rahmen der Schwingungsentkopplung und Dämpfung, des Leichtbaus, der Medizintechnik und der Sensorik vielseitige Anwendungen denkbar. Obwohl nicht alle Werkstoffeigenschaften ausreichend validiert wurden und vor allem das dynamische Werkstoffverhalten weiter untersucht und verbessert werden muss, sollen hier einige mögliche Anwendungsbeispiele vorgestellt werden. In einem N-FKV sind wie in einer Elastomerfeder die Feder und der Dämpfer integriert. Dazu kommen Luft- und Flüssigkeitsdichtigkeit, elektrische Isolation und eventuell nützliche Querbewegungen.

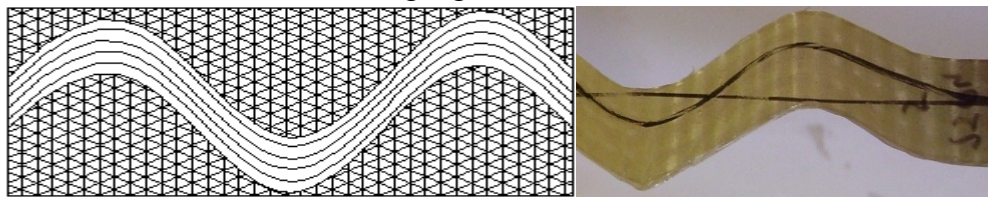


Abbildung 84: Probe mit freischneidbarem Bereich, Schema und real (PU25)

Mit ihrem hochelastischen Verhalten und der stark progressiven Federkennlinie eignen sich die entwickelten N-FKV als Zugfederelement mit gleichzeitiger Dämpfung und Wegbegrenzung durch die unter Last gestreckten Fasern. In Abbildung 85 sind eine flächige und eine seilförmige

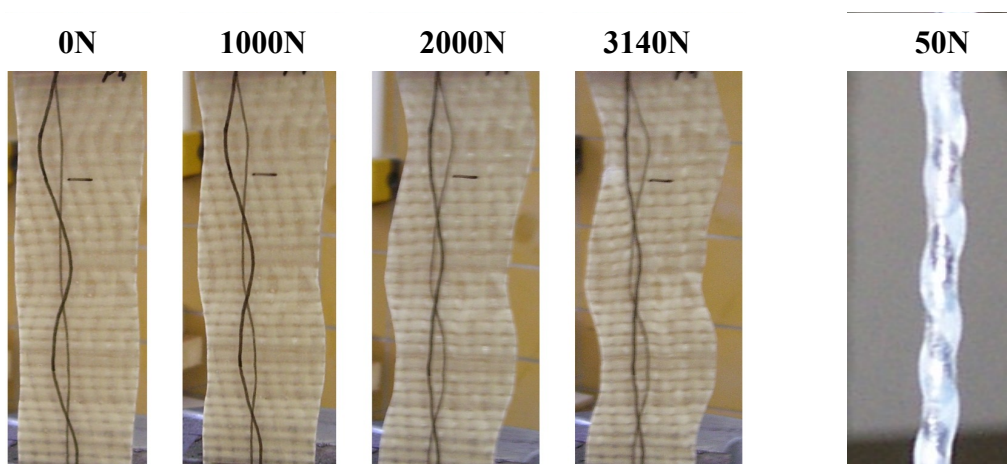


Abbildung 85: Flächige Probe bei Belastung (12PU), seilförmige Probe unter Last (Helix-2)

Zugfeder dargestellt. Neben wenigen Bauteilen und damit einer einfacheren Montage und War-

tung ist auch eine Gewichtsersparnis möglich. Damit könnten N-FKV durch die nahezu unbegrenzten konstruktiven Gestaltungsmöglichkeiten in Elastomerfedern eingesetzt werden, [EF04]. Trotz des relativ frühen Entwicklungsstadiums ist ein Einsatz des neuen Werkstoffes im medizinischen Umfeld denkbar. Vor allem durch die genau konstruierbaren nicht linearen mechanischen Eigenschaften, welche den natürlichen Steifigkeitsverlauf einer Sehne gut nachbilden, sind N-FKV als Biomaterial denkbar. Die ca. 20 bis 25 cm lange und ca. 4 cm breite, elastische (Dehnungen bis 10 %) Achillessehne (Tendo calcaneus) ist die dickste und kräftigste Sehne des Menschen. Der Sehnenquerschnitt beträgt im Mittel 80 mm^2 , wobei die Ansätze (Krafteinleitungen) deutlich breiter sind. Die Sehne erträgt Belastungen von $60 - 100 \text{ N/mm}^2$, was einer Masse von bis zu 800 kg bedeutet. Die Achillessehne ermöglicht das Abrollen und kraftvolle Beugen des Fusses. Die künstliche Sehne des Candence HP-Light (Prothesenfuß mit Kunststoffband, siehe Abbildung 86) begrenzt und kontrolliert das Abrollen, wobei die Bewegungsfreiheit des Fußknöchels wenig eingeengt wird. Beim Abrollen wird Energie aus dem Bein in den Fuß geleitet. Die Nachbildung des menschlichen Fußes mit der wichtigen Achillessehne erlaubt dem Patienten ein gleichförmiges und natürliches Gangbild. Die Nachbildung der Sehne sollte auch das natürliche nichtlineare Werkstoffverhalten haben, damit die Prothese ähnlich dem natürlichen Fuß auf Belastungen reagiert.



Abbildung 86: Cadence HP-Light Prothesenfuß [SeS03]

Hier könnte ein N-FKV zum gewünschten Ergebnis führen. Schon die in dieser Arbeit gezeigten Flachproben erfüllen fast alle Eigenschaften einer natürlichen Achillessehne. Sie sind 25 cm lang, 3 cm breit, lassen Dehnungen bis 10 % zu und haben eine Reißfestigkeit von 98 N/mm^2 . Dabei sind sie flach und kompakt und weisen die charakteristische J-Kurve natürlicher Sehnen im Spannungs-Dehnungs-Verlauf auf.

6 Summary

Investigations on the effect of fiber waviness and non straight reinforcements in a soft polymer matrix on the mechanical properties

Soft fiber reinforced plastics (S-FRP) represent an extension of the application range of fiber reinforced plastics (FRP) in the direction of large deformations and non-linear rigidity. By applying curved fiber reinforcements to a soft polymer its mechanical properties advance to a load-dependent stiffness and a high specific strength. The advantages of the FRP will not be lost. S-FRP combine the elasticity of elastomer, the strength of fibers and the design possibilities of FRP. The present work describes the state of the art in the area of soft reinforced plastics and presents future developments and applications of S-FRP.

Material components and component ratios play a crucial role in the processing and usage of S-FRP. Based on biological tissue with wavy fiber reinforcements the basic principles of fiber orientation, computation models and rheologic assumptions are pointed out. The difference between two-dimensional and three-dimensional fiber waviness is illustrated. Based on a broad search of fiber waviness, process requirements and appropriate manufacturing methods are compiled. The methodology of structural design is used to compare and evaluate the results. At the same time the procedures are practically tested and the warp mechanism supplies the best results. With the developed mechanism preliminary tests with rigid matrices are manufactured and tested. Further ongoing extensive testing with PUR matrix and different semi-finished materials and different waviness ratios is carried out. In the static tension tests, elongations up to 21.5 %, E-moduli from 0.1 GPa to 9.5 GPa and strengths between 180 MPa and 275 MPa are measured. The need for further development regarding the life span of S-FRP is determined in dynamic attempts.

Twisted and braided rovings embedded in a soft matrix were fabricated as a rope. These specimen showed elongation up to 3,5 % and proved the theory of the hyper elastic rope. Further specimen were reinforced in a helix form and were elongated by 19 %. Curved roving reinforcements combined with a soft matrix have shown a potential for use as a highly flexible rope.

Special S-FRP specimen were produced to investigate the fiber matrix interaction and the qualitative stress distribution using the optical stress analysis. Isotropic spots are to be recognized at the fiber turning points. Additionally, stress steps are located near the fiber. Within the specimen with two phase-shifted fibers stress peaks at the roving crossings and in the pressure zones between the fibers are to be observed. Parallel to the optical stress models associated finite element analyses are presented. Based on the material parameters won experimentally, several material and element type models are provided, and the comparisons with the optical stress pattern show a good agreement.

7 Formelzeichen und Abkürzungen

7.1 Formelzeichen

| | |
|---------------|-------------------------------------------------------|
| E | Elastizitätsmodul |
| σ | Spannung |
| V | Volumenanteil |
| ϕ | Faserorientierungswinkel |
| F | Kraft in N |
| A | Flächeninhalt |
| ε | Dehnung |
| λ | Periode |
| a | Amplitude |
| E_s | Steifigkeitsmodul einer Sehne |
| n | Sehnenkonstante |
| a/λ | Amplituden-Perioden Verhältnis, Welligkeitsverhältnis |
| S | spannungsoptische Materialkonstante, N/mm*Ordnung |
| Q | spannungsoptische Gütezahl, Ordnung/mm |
| n | Ordnung, Isochromatenordnung |
| d | Modelldicke, mm |
| l | Lichtwellenlänge |
| C | Spannungsoptische Empfindlichkeit, [B] Brewster |

7.2 Indizes

| | |
|-----|-------------------------------------------|
| f | Faser |
| m | Matrix |
| x | 1. Bauteilhauptachse |
| y | 2. Bauteilhauptachse |
| z | 3. Bauteilhauptachse |
| 1 | Faserlängsrichtung |
| 2 | Richtung senkrecht zur Hauptfaserrichtung |

7.3 Abkürzungen

| | |
|-------|------------------------------------------------------------|
| FKV | Faser Kunststoff Verbund |
| E-FKV | Faser Kunststoff Verbund mit Elastomermatrix, nach [Kos00] |
| N-FKV | Nachgiebiger Faser Kunststoff Verbund |
| ES | Einzelschicht, nach [Mos92] |
| P-ES | Parallele Einzelschicht, nach [Mos92] |
| G-ES | Gewebe Einzelschicht, nach [Mos92] |
| W-ES | Wirrfaser Einzelschicht, nach [Mos92] |
| UD | unidirektional |
| UP | ungesättigter Polyesterharz |
| EP | Epoxidharz |
| PUR | Polyurethan |
| TPE | Thermoplastische Elastomere |
| PET | Polyester |
| PGA | Polyglycolsäure |
| PVC | Polyvinylchlorid |
| PE | Polyethylen |
| GFK | Glasfaser verstärkter Kunststoff |
| CFK | Kohlenstofffaser verstärkter Kunststoff |
| MDI | Diisocyanat-diphenylmethan |
| TDI | Diisocyanat-toluol |
| FEA | Finite-Element-Analyse |
| CT | Computer-Tomographie |
| CAD | Computer Aided Design |
| CLT | classical laminated plate theory |
| KS | Koordinaten System |
| PBO | Phenylen-2.6-benzobisoxazol |
| CF | Carbon-Fiber, Kohlenstofffaser |

8 Literaturverzeichnis

- [ABA06] ABAQUS/Standard User's Manual 6.6-1, Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc., 2006
- [Aen98] Aengenheyster, G., Dimensionierung von Verbundwerkstoffen mit Thermoplast- und Elastomerkomponenten., Verlag Mainz, Mainz, 1988
- [AKU04] Akbarov, S. D., Kosker, R., Ucan, Y., Stress distribution in an elastic body with a periodically curved row of fibers, Mechanics of Composite Materials, Vol. 40, No. 3, Plenum Publishing Corporation, New York, 2004
- [Alb99] Albermarle Co., Produktinformation Ethacure 300 Curative, Albermarle Coporation, Belgium, 1999
- [APC04] Air Products, Produktinformation Airthane PPT-80A, Air Products and Chemicals, Allentown, USA, 2004
- [BaK82] Battermann, Köhler, Elastomere Federung und Elastische Lagerungen, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, München, 1982
- [Bar02] Barbucci, R., Integrated biomaterials science, Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York, 2002
- [Bec73] Becker, R., Polyurethane, VEB Fachbuchverlag, Leipzig, 1973
- [Boc99] Bock, M., Polyurethane für Lacke und Beschichtungen, Vincentz, Hannover, 1999
- [Bon03] Bond-Laminates GmbH, Produktinformation TEPEX dynalite 101-FG290, Bond-Laminates GmbH, Brilon, 2003
- [BrP03] Brökel, J., Prusty, G., Experimental and theoretical investigations on stiffened and unstiffened composite panels under uniform transverse loading., Journal of Composite Structures, Volume 63, Issues 3-4 , February-March 2004, Pages 293-304, Elsevier Science Ltd., London, 2003
- [BrS04] Brökel, J., Scharr, G., Faserverstärkter Kunststoff – ein besonderer Werkstoff im Product Lifecycle Management, 2. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, SaxoPrint, Dresden, 2004
- [BrS05a] Brökel, J., Scharr, G., The specialities of fibre-reinforced plastics in terms of product lifecycle management, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 162-163, Elsevier, Amsterdam, 2005
- [BrS05b] Brökel, J., Scharr, G., Erste Schritte beim Design eines individuellen Werkstoffs am

- Beispiel von N-FKV, 3. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, Shaker Verlag, Aachen, 2005
- [BrS06a] Brökel, J., Scharr, G., Der Einfluss nicht geradlinig eingebrachter Faserverstärkungen auf die mechanischen Eigenschaften von weichen Polymermatrices., Werkstofftechnisches Kolloquium, Chemnitz, 2006
- [BrS06b] Brökel, J., Scharr, G., Experimentelle Untersuchungen an wellig eingebrachten Faserverstärkungen in einer weichen Polyurethanmatrix., 4. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2006, Shaker Verlag, Aachen, 2006
- [ChS99] Chun H.-J., Shin J.-Y., Nonlinear behaviors of thick composites with fiber waviness under pure bending., Materials Science Research International, Vol.5, No.3, Pages 181-188, Kyoto, 1999
- [ChT87] Chou, T.-W., Takahashi, K., Non-linear elastic behaviour of flexible fibre composites, Composites, Vol. 18, No.1, Butterworth Ltd., Guildford, 1987
- [CoF97] Cox, B., Flanagan, G., Handbook of analytical methods for textile composites, Nasa Langley Research Center, Hampton, 1997
- [CoV02] Contro, R., Vena, P., Computational models for biological tissues and biomedical implants, Laboratory of biological structure mechanics, Mailand, 2002
- [CSD01] Chun, H., Shin, J., Daniel, I., Effects of material and geometric nonlinearities on the tensile and compressive behavior of composite materials with fiber waviness, Journal of Composites Science and Technology, Volume 61, Pages 125-134, Elsevier Science Ltd., London, 2001
- [EF04] Eckwerth, P., Frohn, J., Elastische Lagerungen in der Verkehrstechnik, Phoenix Traffic Technology GmbH, Vol. 1-2, pages 48-57, Berlin, 2004
- [Ehr67] Ehrenstein, G., Tensile and Bending Stress in Glass Fibre Reinforced Synthetics - Flat Bars with Embedded Glass Fibres , IWF, Göttingen, 1967
- [Erh99] Erhard, G., Konstruieren mit Kunststoffen, Carl Hanser Verlag, Wien, 1999
- [Eri02] Erickson, L., Tendon, <http://www.tendinosis.org>, Stanford, 2002
- [Fes06] Festo AG & Co. KG, www.festo.com, online Katalog, Festo AG & Co. KG, Stuttgart, 2006
- [For06] Forsheda AS, Ruckdämpfer, www.forsheda.no, Oslo, 2006
- [Fra96] Franck, A., Kunststoff Kompendium, Vogel Buchverlag, Würzburg, 1996

- [Fri88] Friedrich W., Tabellenbuch Metall- und Maschinentechnik, Dümmler Verlag, Bonn, 1988
- [FZR95] Flemming, M., Ziegmann, G., Roth, S., Faserverbundbauweisen - Fasern und Matrices, Springer Verlag, Berlin, 1995
- [GaB97] Gabrys, C.W., Bakis, C.E., Design and manufacturing of filament wound elastomeric matrix composite flywheels, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Sage Publications, London, 1997
- [Gor89] Gordon, J. E., Strukturen unter Stress, Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg, 1989
- [Gri06] Gries, T., Vorlesung FVW II - Werkstoffe II / Preforming, Institut für Textiltechnik, RWTH, Aachen, 2006
- [Häb03] Häberlein, M., Kautschuktechnologie, FH Frankfurt a. M., Verfahrenstechnik, Frankfurt a. M., 2003
- [Hau06] Haufler GmbH, Produktinformation EC14 2400 tex, www.haufler.biz, Blaubeuren, 2006
- [HHH04] Hellerich, Harsch, Haenle, Werkstoff-Führer Kunststoffe, 9. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2004
- [Hof91] Hofmann, R., Duroplaste zeigen sich elastisch, VDI-Nachrichten 45(47) S.32, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991
- [Hor55] Horridge, G. A., A polarized light study of glass fibre laminates., Royal Aircraft Establishment, Farnborough, 1955
- [HWD94] Hsiao, H., Wooh, S., Daniel, I., Fabrication methods for unidirectional and crossply composites with fiber waviness, Journal of Advanced Materials, Covina Calif., 1994
- [ISA95] Iannace, S., Sabatini, G., Mechanical behaviour of composite artificial tendons and ligaments, Biomaterials, Volume 16, Issue 9, Elsevier Science Ltd., London, 1995
- [JLD04] Jacobsen, A., Luo, J., Daniel, I., Characterization of Constitutive Behavior of Satin-weave Fabric Composit., Journal of Composite Materials, Sage Publications, London, 2004
- [KBM06] Kliewe, C., Brökel, K., Mittelmeier, W., Entwicklung und Testung von innovativen, versagenssicheren Implantaten für die Endoprothetik, Universität Rostock, Rostock, 2006

- [KCH00] Klute, G. K., Czerniecki, J. M., Hannaford, B., Artificial tendons: biomechanical design properties for prosthetic lower limbs, World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, Chicago, 2000
- [KFL01] Köckritz, U., Franzke, G., Leopold, T., Offermann P., Nähgewirkte Gelege aus CF-PEEK-Hybridgarn für textilverstärkte Faserverbundrotoren., WILEY-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2001
- [Klo05] Kloss, E., Faserverstärkte Kunststoffe – neue Anwendungen und Perspektiven durch weiche Matrices?, Unveröffentlichte Projektarbeit, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik / Leichtbau, Universität Rostock, Rostock, 2005
- [KoA03] Kosker, R., Akbarov, S. D., Influence of the interaction between two neighboring periodically curved fibers on the stress distribution in a composite material, Mechanics of Composite Materials, Vol. 39, No. 2, Plenum Publishing Corporation, New York, 2003
- [Kos00] Koschmieder, M., Verarbeitung und Eigenschaften von Faserverbundkunststoffen mit Elastomermatrix, Dissertation RWTH Aachen, Aachen, 2000
- [KTC88] Kuo, C., Takahashi, K., Chou, T., Effect of fiber waviness on the nonlinear elastic behaviour of flexible composites, Journal for Composite Materials, Vol. 22, Technomic Publishing Co., London, 1988
- [KW88] Knauer, B., Wende, A., Konstruktionstechnik und Leichtbau, Akademie-Verlag, Berlin, 1988
- [Loh05] Lohmann, S., Eigenschaften biologischer Materialien zur Simulation menschlicher Bewegung, Universität Konstanz, Fachbereich Geschichte und Soziologie, Konstanz, 2005
- [Loy89] Loy W., Taschenbuch für die Textil Industrie, Schiele und Schön GmbH, Berlin, 1989
- [Lüt02] Lütze, S., Experimentelle Untersuchung des mikromechanischen Schädigungsverhaltens polymerer Faserverbundwerkstoffe, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde Universität Stuttgart, Stuttgart, 2002
- [MeM02] Metso Minerals, Trellex Fördergurtemit Gewebezugträger, Metso Minerals Sweden, Trelleborg, 2002
- [Men90] Menges, G., Werkstoffkunde Kunststoffe, Carl Hanser Verlag, München, 1990
- [Mic94] Michaeli, W., Dimensionieren mit Faserverbundwerkstoffen: Einführung und praktische Hilfen, Carl Hanser Verlag, München, 1994

- [MLW06] Müller T., Lampke T., Wielage B., Berechnung des thermoplastischen Verhaltens gewebeverstärkter CMCs in Präzisionsgleitlagern, 9. WTK, TU Chemnitz, Eigenverlag, Chemnitz, 2006
- [Mos92] Moser, K., Faser-Kunststoff-Verbund, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1992
- [Mur99] Murri, G. B., Influence of ply waviness on fatigue life of tapered composite flexbeam laminates, U.S.Army Research Laboratory, Hampton, 1999
- [OSc88] Otte, P., Schlegel, K., Bücherei des Orthopäden, Orthopädische Biomechanik, Band 51, Enke Verlag, Stuttgart, 1988
- [Par84] Park, J. B., Biomaterials science and engineering, Plenum Press, New York, 1984
- [Pas05] Paschen, M., Nichtgeradlinig angeordnete Faserverstärkungen in Kunststoffen – ein neuer Werkstoff?, Unveröffentlichte Diplomarbeit, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik / Leichtbau, Universität Rostock, 2005
- [PLG95] Pahl, Gleißle, Laun, Praktische Rheologie der Kunststoffe und Elastomere, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995
- [Rei05] Reinboth, T., Untersuchung der Fasergeradlinigkeit angängigen 2-D Faserhalbzeugen, 3-D Laminatverstärkungen, mit entsprechenden Fertigungsversuchen, unveröffentlichte Projektarbeit am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik / Leichtbau, Universität Rostock, Rostock, 2005
- [RHK04] Ramakrishna, S., Huang, Z.-M., Kumar, G. V., An introduction to biocomposites, Imperial College Press, London, 2004
- [RuG05] www.R-G.de, Handbuch, Faserverbundwerkstoffe GmbH, Waldenbuch, 2005
- [Sc06a] Scharr, G., DE 20 2005 020 800, Federelement, 2006
- [Sc06b] Scharr, G., DE 202006061969, Hyperelastische Seilfeder, 2006
- [ScE04] Scharr, G., Ebert, J., 3D-Verstärkung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen mit Hilfe von CFK-Nadeln und -Stiften, Schiffbauforschung 43, Rostock, 1/2004
- [Sch05] Schmidt, W., Wunderwerk mit Haken, Echo Online GmbH, Darmstadt, 2005
- [SeS03] Seattle Systems, Prosthetics Cadence HP, Seattle Systems Inc., Poulbo, USA, 2003
- [SHe01] Sickinger, C., Herrmann, A., Structural stitching as a method to design high-performance composites in future, Institute of Structural Mechanics, German Aerospace Center Brunswick, 2001

- [Swi75] Swift, D. G., Elastic moduli of fibrous composites containing misaligned fibres, Journal of Applied Physics, Vol. 8, London, 1975
- [Ten94] Tenzler, A., Entwicklung einer Methode zur Ermittlung von Kerbwirkungen an impactbeanspruchten Faserverbundwerkstoffen, VDI-Fortschrittberichte, Reihe 18, Nr. 158, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994
- [Tor06] Toray Industries Inc., Produktinformation T800B, www.toray.com, Tokio, 2006
- [VDI03] VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, Elastomere im Automobilbau, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2003
- [ViH66] Vieweg, R., Höchtlen, A., Kunststoff-Handbuch VII Polyurethane, Carl Hanser Verlag, München, 1966
- [Wac06] Wacker Chemie GmbH, Elastosil, Wacker Chemie GmbH, München, 2006
- [Wag06] Wagner H.-J., Einführung in den aktiven und passiven Bewegungsapparat, Anatomisches Institut, Universität Tübingen, Tübingen, 2006
- [WKL02] Wielage, B., Kieselstein, E., Leonhardt, G., Simulation der elastischen Eigenschaften gewebeverstärkter Verbundwerkstoffe unter Berücksichtigung der Mikrostruktur, TU-Chemnitz, Chemnitz, 2002
- [Wol76] Wolf, H., Spannungsoptik - Band 1 - Grundlagen, Springer-Verlag, Berlin, 1976